

Grado Universitario en Tecnologías Industriales
2017 - 2018

Trabajo Fin de Grado

“Generación sostenible de agua para cubrir la demanda de una isla mediterránea”

Guillermo Fernández Gil

Tutor

Fontina Petrakopoulou

Leganés, Julio 2018



[Incluir en el caso del interés de su publicación en el archivo abierto]

Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento
– No Comercial – Sin Obra Derivada**

RESUMEN

El aumento de la demanda de agua debido al crecimiento poblacional, el descenso de los niveles de precipitación, la escasez de agua subterránea y superficial junto con las altas necesidades de riego son los factores que crean problemas de escasez de agua en el archipiélago Egeo. Para hacer frente a estas necesidades, agravadas por la calidad inadecuada del agua, esta es transportada por barcos desde el continente u otras islas vecinas a un alto coste. El objetivo del presente estudio es proporcionar una red de suministro de agua para una isla del mar Egeo, llamada Skyros, la cual puede servir de ejemplo para otras islas similares. En primer lugar, se llevaron a cabo varias investigaciones para cuantificar la distribución de la demanda de agua en la isla. Con el propósito de cubrir esta demanda con una calidad aceptable, se propusieron y evaluaron soluciones basadas en el uso del agua proveniente de: fuentes naturales existentes en la isla, plantas de desalinización y plantas de tratamiento de aguas residuales. En paralelo, se logró la optimización del coste total del proyecto. Este coste tiene en cuenta el transporte de agua entre los asentamientos (instalación, operaciones y mantenimiento) y el suministro de energía proveniente de fuentes renovables. La solución propuesta muestra que el proyecto podría ahorrar grandes cantidades de dinero proporcionando a su vez una gran calidad de agua a la isla.

Palabras clave

Escasez de agua, desalinización, isla, tratamiento de aguas residuales, energías renovables, cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermana, que me han dado la formación humana y académica necesaria para poder estudiar este grado y llevar a cabo la realización de este proyecto. Todo esto no hubiese sido posible sin su apoyo incondicional y la confianza que han depositado en mí todos estos años.

A mi tutora de la UC3M, por su ayuda desde el comienzo de este proyecto brindándome definitivamente todas las herramientas necesarias para completar mi trabajo de fin de grado satisfactoriamente.

Finalmente, a todos mis amigos y compañeros. No solo han estado ahí apoyándome en los momentos difíciles, sino que también hemos disfrutado juntos de los mejores momentos de mi vida universitaria.

A todos, muchas gracias.

Madrid, a 18 de junio de 2018

Guillermo Fernández Gil

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 Motivación del Trabajo. | 1 |
| 1.2 Objetivos. | 1 |
| 1.3 Marco regulador. | 1 |
| 1.3.1 Agua potable. | 1 |
| 1.3.2 Desalinización de agua mediante energías renovables. | 2 |
| 1.3.3 Reutilización de agua. | 3 |
| 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN | 4 |
| 2.1 Marco actual. | 4 |
| 2.2 Gestión de los recursos hídricos en la isla. | 5 |
| 3. ANÁLISIS DE LA CUESTIÓN | 7 |
| 3.1 Periodo de diseño. | 7 |
| 3.2 División en zonas hídricas. | 8 |
| 3.3 Estimación de la demanda futura total de la isla. | 8 |
| 3.4 Sistema de coordenadas y mapa de altitudes | 12 |
| 3.5 Ubicación de las diferentes infraestructuras. | 14 |
| 3.6 Alternativas para gestión del agua en la isla. | 15 |
| 3.7 Análisis de la calidad de agua de Anavalsa. | 16 |
| 4. DISEÑO DE LA RED | 18 |
| 4.1 Principios básicos del flujo en tuberías. | 18 |
| 4.2 Problemas del flujo en tuberías. | 20 |
| 4.2.1 Caudal. | 20 |
| 4.2.2 Diámetro. | 20 |
| 4.3 Líneas de transmisión. | 20 |
| 4.3.1 Transporte por gravedad. | 21 |
| 4.3.2 Transporte por bombeo. | 22 |
| 4.3.3 Elección de transporte por gravedad o por bombeo. | 22 |
| 4.4 Elección del material de construcción. | 23 |
| 4.5 Funciones de costes. | 23 |
| 4.6 Unificación de costes. | 25 |

| | | |
|---------|--|----|
| 4.7 | Parámetros elementales para el dimensionamiento de la red. | 26 |
| 5. | DESALINIZACIÓN | 29 |
| 5.1 | Salinidad y temperatura del agua. | 30 |
| 5.2 | Metodología. | 32 |
| 5.3 | Tecnologías incluidas. | 32 |
| 5.3.1 | Destilación súbita Flash (MSF). | 33 |
| 5.3.2 | Destilación multiefecto (MED). | 34 |
| 5.3.3 | Termocompresión de vapor (TVC). | 34 |
| 5.3.4 | Ósmosis inversa (RO). | 35 |
| 5.4 | Modelos técnicos para la desalinización | 37 |
| 5.5 | Modelos económicos para la desalinización. | 38 |
| 6. | TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL | 40 |
| 6.1 | Aplicaciones de reutilización del agua. | 40 |
| 6.2 | Requisitos infraestructurales para la reutilización de agua. | 42 |
| 6.2.1 | Recolección de aguas residuales. | 42 |
| 6.2.2 | Tratamiento. | 43 |
| 6.3 | Caudal disponible. | 45 |
| 6.4 | Análisis económico. | 45 |
| 7. | IMPORTACIÓN DE AGUA EN BARCO | 48 |
| 8. | RESULTADOS | 49 |
| 8.1 | Alternativa I. | 49 |
| 8.1.1 | Zonas 1-2. | 49 |
| 8.1.1.1 | Suministro de agua apta para el consumo humano. | 49 |
| 8.1.1.2 | Sistema de recogida de aguas residuales. | 51 |
| 8.1.1.3 | Sistema de alimentación desalinizadoras-embalses. | 52 |
| 8.1.1.4 | Coste producción de agua en desalinizadoras. | 53 |
| 8.1.1.5 | Coste tratamiento de aguas residuales. | 54 |
| 8.1.2 | Zonas 3-4. | 55 |
| 8.2 | Alternativa II. | 56 |
| 8.2.1 | Zonas 1-2. | 56 |
| 8.2.1.1 | Suministro de agua apta para el consumo humano. | 56 |
| 8.2.1.2 | Coste producción de agua en desalinizadoras. | 57 |
| 8.3 | Análisis de los resultados. | 59 |

| | | |
|---------|--------------------------------------|-----|
| 8.4 | Comparación con la situación actual. | 60 |
| 9. | CONCLUSIONES | 61 |
| 10. | BIBLIOGRAFÍA | 62 |
| ANEXO A | | 64 |
| ANEXO B | | 73 |
| ANEXO C | | 79 |
| ANEXO D | | 88 |
| ANEXO E | | 90 |
| ANEXO F | | 99 |
| ANEXO G | | 103 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| TABLA I. Habitantes de los diferentes asentamientos de skyros según el censo de 2011. | 5 |
| TABLA II. Periodo de diseño para redes de abastecimiento [12]. | 7 |
| TABLA III. Caso I y caso II usados para iterar. | 10 |
| TABLA IV. Iteraciones sucesivas. | 10 |
| TABLA V. Cantidades de agua importadas a algunas islas en metros cúbicos por año | 15 |
| TABLA VI. Rugosidad para diferentes materiales [13]. | 19 |
| TABLA VII. Factores máximos diarios y horarios según la población [13] . | 27 |
| TABLA VIII. Métodos de desalinización [27]. | 29 |
| TABLA IX. Posibles aplicaciones del agua residual en las islas del mar egeo [16]. | 40 |
| TABLA X. Principales proyectos de tratamiento de agua residual en grecia [5] . | 41 |
| TABLA XI. Parámetros microbiológicos y químicos mínimos para uso agrícola [33] . | 42 |
| TABLA XII. Costes unitarios por metro cúbico [16]. | 46 |
| TABLA XIII. Requerimientos energéticos por unidad de volumen [16]. | 47 |
| TABLA XIV. Coste por unidad de volumen para el transporte de agua [16]. | 48 |
| TABLA XV. Costes sistema de transporte de agua potable. | 50 |
| TABLA XVI. Sistema de recogida de aguas residuales. | 51 |
| TABLA XVII. Sistema de alimentación desalinizadoras-embalses. | 52 |
| TABLA XVIII. Costes anuales de la desalinización de agua. | 53 |
| TABLA XIX. Costes anuales del tratamiento de aguas . | 55 |
| TABLA XX. Costes sistema de transporte de agua potable. | 57 |
| TABLA XXI. Costes anuales de la desalinización de agua . | 58 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Fig. 2.1. Localización de Skyros en el mapa. | 4 |
| Fig. 3.1. Zonas hídricas en la isla. | 9 |
| Fig. 3.2. Gráfico del crecimiento poblacional durante los años 2002 y 2038. | 11 |
| Fig. 3.3. Gráfico del crecimiento de la demanda durante los años 2002 y 2038..... | 12 |
| Fig. 3.4. Sistema de coordenadas | 13 |
| Fig. 3.5. Mapa de líneas de contorno cada 100m. | 13 |
| Fig. 3.6. Importantes zonas ambientales..... | 14 |
| Fig. 4.1. Esquema transporte de agua por gravedad [13]. | 21 |
| Fig. 5.1. Estaciones medidoras. | 30 |
| Fig. 5.2. Temperatura del agua. | 31 |
| Fig. 5.3. Salinidad del agua. | 31 |
| Fig. 5.4. Esquema del funcionamiento de DEEP | 32 |
| Fig. 5.5. Diagrama de planta de destilación súbita Flash (MSF) [29] | 33 |
| Fig. 5.6. Diagrama de planta de destilación multiefecto (MDE) [29] | 34 |
| Fig. 5.7. Diagrama de planta de termocompresión de vapor (TVC) [29]..... | 35 |
| Fig. 5.8. Principio de funcionamiento de la ósmosis inversa [29]..... | 36 |
| Fig. 5.9. Componentes básicos de un sistema RO [29]. | 37 |
| Fig. 5.10. Esquema de los costes evaluados por el programa. | 38 |
| Fig. 5.11. Diagrama de flujo del escenario usado | 39 |
| Fig. 6.1. Sistemas de recolección; a) alcantarillado por gravedad, e) sistema de recolección por vacío [34]. | 43 |
| Fig. 6.2. Tecnologías para el tratamiento de aguas residuales [34]..... | 44 |
| Fig. 8.1. Sistema desestimado. | 50 |
| Fig. 8.2. Sistema de conexiones Alternativa 1. | 51 |
| Fig. 8.3. Sistema de recogida de aguas residuales..... | 52 |
| Fig. 8.4. Sistema de alimentación desalinizadoras-embales..... | 53 |
| Fig. 8.5. Esquema de las plantas desalinizadoras de las zonas 1 y 2 (alternativa 1). | 54 |
| Fig. 8.6. Gráfico de tecnologías de desalinización renovables [35]. | 56 |
| Fig. 8.7. Sistema de conexiones alternativa 2..... | 57 |
| Fig. 8.8. Esquema de las plantas desalinizadoras de las zonas 1 y 2 (alternativa 2). | 58 |
| Fig. 8.9. Distribución de costes alternativa 1. | 60 |
| Fig. 8.10. Distribución de costes alternativa 2. | 60 |

NOTACIONES

| | |
|-----------|---|
| A_0 | Anualidad inversión inicial |
| A_r | Plazo anual |
| C_A | Coste capitalizado |
| C_m | Coste unitario de tubería |
| C_N | Coste neto |
| C_0 | Coste inicial de los componentes |
| C_P | Coste unitario bomba |
| C_R | Coste unitario embalse |
| CSP | Central termosolar por concentración |
| DEEP | Desalination Economic Evaluation Program |
| h_x | Altura manométrica para una distancia x de la tubería |
| k_m | Coeficiente para coste de tuberías |
| k_p | Coeficiente para coste de bombas |
| k_T | Coeficiente coste de bombas y bombeo |
| IAEA | Organismo Internacional de Energía Atómica |
| m | Exponente coste de tuberías |
| MED | Destilación multiefecto |
| MSF | Destilación súbita (flash) |
| P | Potencia realizada |
| PE | Población equivalente, polietileno |
| PV | Planta fotovoltaica |
| PVC | Policloruro de vinilo |
| RO | Ósmosis Inversa |
| T | Periodo de diseño del sistema |
| TRR | Ingreso anual requerido |
| TVC | Termocompresión de vapor |
| V_R | Capacidad del embalse |
| α | Tasa constante aumento del caudal |
| β | Coste de mantenimiento anual |
| λ | Multiplicador de Lagrange |
| ρ | Densidad del fluido |
| η | Rendimiento del sistema de bombeo |

| | |
|----------|-------------------------|
| η_H | Rendimiento hidráulico |
| η_v | Rendimiento volumétrico |
| η_M | Rendimiento mecánico |
| η_E | Rendimiento eléctrico |

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación del Trabajo.

Acabar con los problemas de escasez de agua es uno de los retos que la sociedad tendrá que afrontar en un futuro cercano. Este obstáculo es agravado en zonas como islas, carentes de recursos hídricos y cuyo aislamiento dificulta el transporte de este bien.

La motivación de este proyecto es, por tanto, poner en práctica todo lo aprendido en el grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales para aportar una solución al problema de escasez de agua en lugares aislados del continente. Se tomó como escenario una isla mediterránea llamada Skyros para la cual, en un proyecto anterior, se propusieron diferentes alternativas para cubrir la demanda energética mediante energías renovables. Como continuación de este proyecto y con el objetivo de convertirla en una isla autosuficiente desde el punto de vista energético e hídrico, se aportó una solución para cubrir la demanda de agua de la isla.

1.2 Objetivos.

El objetivo de este proyecto es analizar el estado actual de los problemas de abastecimiento de agua en la isla y posteriormente aportar un sistema de aprovisionamiento de agua sostenible para una isla piloto. Además, como último fin, este proyecto pretende mostrar la viabilidad de este tipo de soluciones sostenibles, que actualmente son desestimadas desde un primer momento por la mayoría de los organismos públicos, mediante un riguroso análisis económico. Este tipo de nuevas prácticas son tremendamente necesarias en un futuro donde las necesidades humanas crecen exponencialmente al mismo tiempo que los recursos disponibles disminuyen de manera acelerada.

1.3 Marco regulador.

1.3.1 Agua potable.

A la hora de decidir cuál es la calidad mínima del agua para el consumo humano, es la Directiva Europea la que a través del Consejo 98/83/EC del 3 de noviembre de 1998 estableció los principales parámetros a considerar. Su objetivo es proteger la salud humana de los efectos adversos de la contaminación del agua dedicada al consumo

humano asegurando que esta sea saludable y limpia. La directiva de agua potable aplica sobre:

- Todo sistema de distribución que abastezca a más de 50 personas o suministre más de 10 m³/día, pero también todo sistema de distribución si el agua es suministrada como parte de una actividad económica.
- Agua potable procedente de tanques.
- Agua potable en botellas o recipientes.
- Agua usada en la industria alimentaria, a menos que sea aceptada por las autoridades nacionales.

De acuerdo con estos dos primeros puntos, se decidió usar esta normativa a la hora de asegurar la calidad del agua en la isla. Los parámetros de los que hablamos se pueden encontrar en la referencia [1] y se encuentran resumidos en el Anexo A.

1.3.2 Desalinización de agua mediante energías renovables.

Para la instalación de plantas desalinizadoras basadas en energías renovables no existe ningún procedimiento administrativo estándar. Por tanto, la práctica general consiste en seguir la licencia de procedimientos para el agua, junto con los procedimientos aplicados para la producción de energía, manejo de efluentes y otros aspectos relacionados. Según la Directiva de la Junta Ministerial 15393/2002, la desalinización pertenece a proyectos industriales, caracterizados como proyectos con impactos ambientales medios o bajos según su tamaño (capacidad de agua producto). De acuerdo con la Ley 3325/2005, para el establecimiento de una instalación se requieren una serie de permisos otorgados por el órgano “Hellenic Public Real Estate Corporation [2].

Adicionalmente, se debe tener en cuenta que en el caso de la construcción de plantas con interés público (por ejemplo, el suministro de agua a municipios) se pueden seguir procedimientos especiales disminuyendo los requisitos previos o incluso facilitando cuestiones de asignación de tierras.

Por otro lado, no existe un marco legal sobre la disposición de salmuera. Por tanto, en el caso de pequeñas plantas autónomas se lleva a cabo la eliminación de la salmuera sin un permiso relativo de las autoridades, mientras que para el caso de grandes plantas de desalinización que son mayormente subsidiadas por el estado, se establecen decisiones legales especiales para la legitimación de esta disposición de salmuera.

1.3.3 Reutilización de agua.

Grecia, con una población de aproximadamente 11 millones de habitantes, tiene que cumplir con el tratado llamado “Urban Wastewater Treatment Directive” (271/91) [3] . De acuerdo con esta Directiva, Grecia como miembro de la Unión Europea, está obligada a conectar todas las urbanizaciones con más de 2000 PE a plantas de tratamiento de agua residual para finales del 2005. En 2005 según la referencia [4], 350 plantas de tratamiento de agua residual cubrían un 75% de la población. En 2011 el Ministerio Griego de Medio ambiente, energía y cambio climático informó de que un 100%, 93%, 74% y 32% de las poblaciones urbanas con una población equivalente de 150,000, 15,000-150,000, 10,000-15,000, 2,000-10,000, respectivamente, estaban cubiertas por plantas de tratamiento de agua residual cumpliendo con la normativa [5]. Sin embargo, un 10% de la población vive en pequeños asentamientos con poblaciones menores de 500 PE, para las cuales se debe de buscar una solución viable.

2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

2.1 Marco actual.

Skyros pertenece a la prefectura de Eubea en la región de Grecia central. La isla está situada en la parte más al sur de las islas Espóradas del mar Egeo con una extensión de 208,594 km² siendo la isla más grande de este grupo [6].

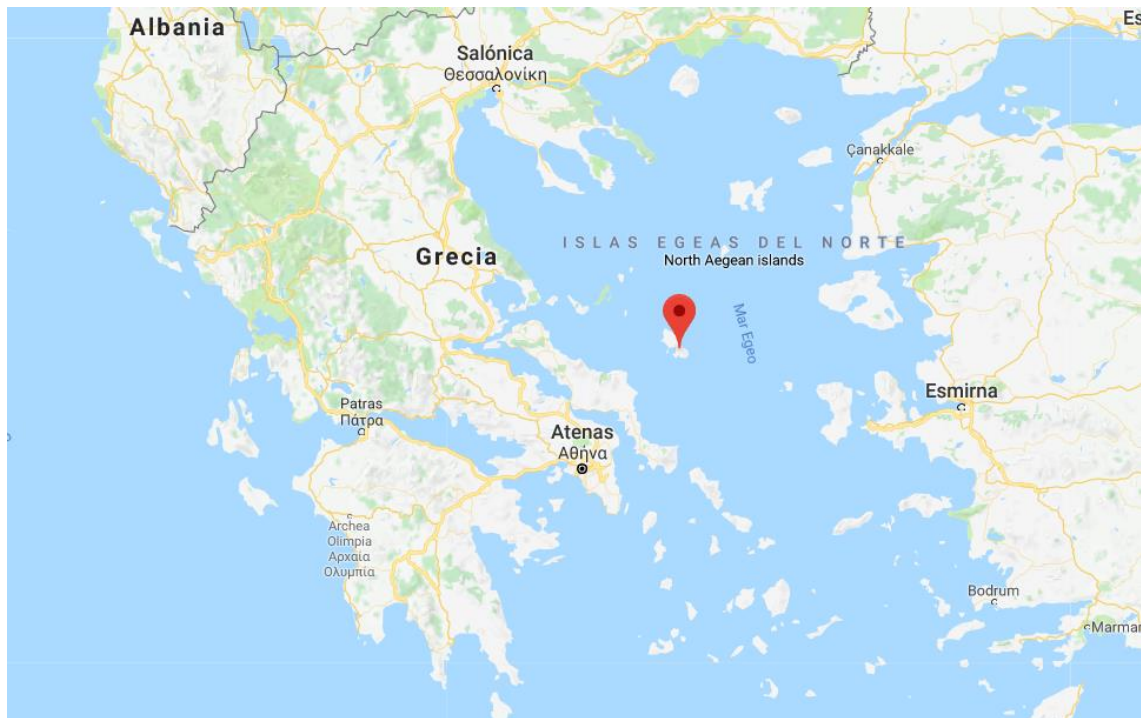


Fig. 2.1. Localización de Skyros en el mapa.

El clima en la isla es mediterráneo, con veranos frescos e inviernos templados. La temperatura media anual en la isla es de 17 °C con una temperatura máxima de 27.8 °C y una temperatura mínima absoluta de 7.3 °C. Aunque la presencia de nubes es frecuente, las lluvias son bastante escasas a lo largo del año, lo que agrava las situaciones de sequía [7].

Según el último censo disponible (2011), Skyros tiene 2,994 habitantes [8]. Es una isla de pequeño tamaño según su población, caracterizada por una baja densidad de población (unos 20 habitantes/ km²). Skyros tiene 19 poblaciones diferentes, 4 de las cuales son pequeños islotes que rodean la isla principal. La mayoría de la población reside en Skyros (en la parte nordeste de la isla), mientras que los demás habitantes residen en otros pequeños asentamientos (Tabla I).

TABLA I.
HABITANTES DE LOS DIFERENTES ASENTAMIENTOS DE SKYROS SEGÚN EL CENSO DE 2011.

| NOMBRE DEL ASENTAMIENTO | HABITANTES (2011) |
|-------------------------|-------------------|
| ASPOUS | 107 |
| ATSITSA | 13 |
| ACHEROUNES | 65 |
| ACHILLI | 53 |
| KALAMITSA | 43 |
| KALIKRI | 43 |
| LINARIA | 116 |
| MOLOS | 618 |
| NIFI | 31 |
| SKYROS | 1657 |
| TRACHI | 196 |
| TOTAL | 2994 |

La mayoría de los habitantes de Skyros se dedican a la agricultura, pesca y pequeña industria. El desarrollo del turismo en esta isla, a diferencia de otras islas, es bastante suave. Esto permite un control de la demanda de energía y agua en los periodos vacacionales.

A pesar de su suave aumento turístico, el desarrollo de la isla ha sido notable en las tres últimas décadas. Esto se puede apreciar en un aumento considerable de la población [8] y el Producto Interior Bruto. De acuerdo con datos recientes, el PIB de las islas aumenta más rápidamente que en el resto del país [9].

2.2 Gestión de los recursos hídricos en la isla.

Tradicionalmente el agua ha sido un recurso bastante importante en la región del mar Egeo, principalmente debido a las bajas precipitaciones. Es un hecho, que el desarrollo y la calidad de vida en estas islas dependen principalmente de la disponibilidad y suficiencia de recursos hídricos [10].

El suministro de agua en la isla procede de una fuente llamada Anavalsa, situada al nordeste de Skyros, proporcionando un caudal de 2,400 – 2,600 m³/día. Existe otra fuente

de menor tamaño llamada Nifaki que puede proporcionar hasta 240 m³/día. El hecho de que esta cantidad de agua resulte insignificante y las largas distancias que la separan de cualquier asentamiento, hizo que se desestimara para los cálculos del sistema. Según los últimos datos disponibles, la demanda máxima se da en los meses de verano (aproximadamente 2.3 millones de m³/año en 2002). Esta demanda de agua se divide en dos tipos diferentes; por un lado, el agua usada para riego (65% del total) y por otro el consumo urbano e industrial (35% del total) [11].

En general, Skyros tiene buenas reservas de agua. Estas reservas son la razón por la que se llevó a cabo la construcción de un nuevo embalse en el área de Ferekampos con una capacidad de 1,000,000 m³. A pesar de que la cantidad de agua en Skyros es bastante buena, su calidad no es adecuada en la mayoría de los asentamientos de la isla.

En caso de que la demanda urbana no pueda ser satisfecha con los medios disponibles o la calidad del agua no sea suficientemente aceptable para el consumo humano, se opta por el transporte de agua desde el continente o desde islas vecinas. El coste asociado a este método es bastante alto además de que es insostenible ya que no crea una infraestructura como solución a largo plazo. De este problema surge la motivación de este proyecto, que pretende aportar una solución viable para un futuro en el que la demanda de recursos hídricos se prevé que aumente de manera exponencial.

3. ANÁLISIS DE LA CUESTIÓN

3.1 Periodo de diseño.

El periodo de diseño (también llamado vida de diseño) no es lo mismo que vida útil. El periodo de diseño es la duración estimada en la que el sistema será capaz de satisfacer la demanda llamada capacidad de diseño. Los nuevos sistemas de aprovisionamiento de agua están generalmente contruidos para satisfacer la demanda en un futuro. El número de años seleccionado depende de los siguientes aspectos:

- Restricciones regulatorias.
- Ratio de crecimiento de la población.
- Ratio de interés.
- La vida útil de los equipos y estructuras.
- La dificultad de expansión.
- Funcionamiento del sistema durante los primeros años trabajando con la mínima carga hidráulica.

Según los parámetros anteriores se decidió optar por un periodo de diseño de 20 años. Este coincide con el periodo de diseño más empleado para sistemas de distribución que, en este proyecto, ocupa la mayor parte del presupuesto [12].

TABLA II.
PERIODO DE DISEÑO PARA REDES DE ABASTECIMIENTO [12].

| TIPO DE INSTALACIÓN | CARACTERÍSTICAS | PERIODO DE DISEÑO | VIDA ÚTIL |
|---------------------------|----------------------------|-------------------|-----------|
| GRANDES PRESAS Y TUBERÍAS | Difícil y caro de ampliar | 40-60 | 100+ |
| POZOS | Fácil de reemplazar | 15-25 | 25+ |
| PLANTAS DE TRATAMIENTO | | | |
| INSTALACIONES FIJAS | Difícil y caro de ampliar | 20-25 | 50+ |
| EQUIPOS | Fácil de reemplazar | 10-15 | 10-20 |
| SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN | Reemplazamiento es difícil | 20-25 | 60+ |

3.2 División en zonas hídricas.

Debido a que la isla cuenta con numerosos asentamientos de pequeño tamaño, se decidió dividir la isla en cuatro zonas hídricas. Se optó por la división en dos grandes grupos de demanda y dos puntos aislados para los cuales se aportaron medidas de suministro de agua diferentes. Esta agrupación de los asentamientos se basa sobre todo en condiciones de proximidad entre los municipios, así como características topográficas. Las cuatro zonas diferentes se pueden apreciar en la Fig. 3.1 y son las siguientes:

1. Se trata de un grupo de cuatro asentamientos principales (Skyros, Malos, Aspous y Achilli) que juntos hacen un total de 2,435 habitantes representando un 83% del total de la isla.
2. Grupo de 5 asentamientos situados en el centro de la isla (Acherounes, Kalikri, Linaria, Kalamitsa y Nifi) formando un total de 298 habitantes que representan un 10% del total de la isla.
3. Grupo constituido únicamente por Trachi, ciudad aislada al norte de la isla con un total de 196 habitantes, representando un 6% del total de la isla.
4. Ciudad de Atsitsa, aislada al norte de la isla con un total de 16 habitantes que representan un 1% de la población total.

3.3 Estimación de la demanda futura total de la isla.

A la hora de aportar una solución al problema se tuvo en cuenta el aumento de la población y el consecuente aumento de la demanda de agua en la isla. Por ello, a partir de los datos disponibles, se estimó la demanda para un lapso de 20 años llamado periodo de diseño. Esto es debido a que las líneas de transporte de agua deben ser diseñadas para un flujo correspondiente al último año del periodo de diseño, es decir, la demanda máxima que ocurre en 2038. Esta aproximación es aceptada para el caso de los medios de transporte por gravedad. Sin embargo, si un sistema de bombeo es diseñado para la demanda final, esta resultará económicamente pobre durante los primeros años. Esto es debido a que existe una compensación entre los diámetros y la altura manométrica de las bombas, a menor diámetro menor inversión económica, pero requiere un mayor coste energético según el flujo aumenta a lo largo de los años. Para simplificar este aspecto, se consideró el diámetro más favorable aquel correspondiente al último flujo del periodo de diseño [13].

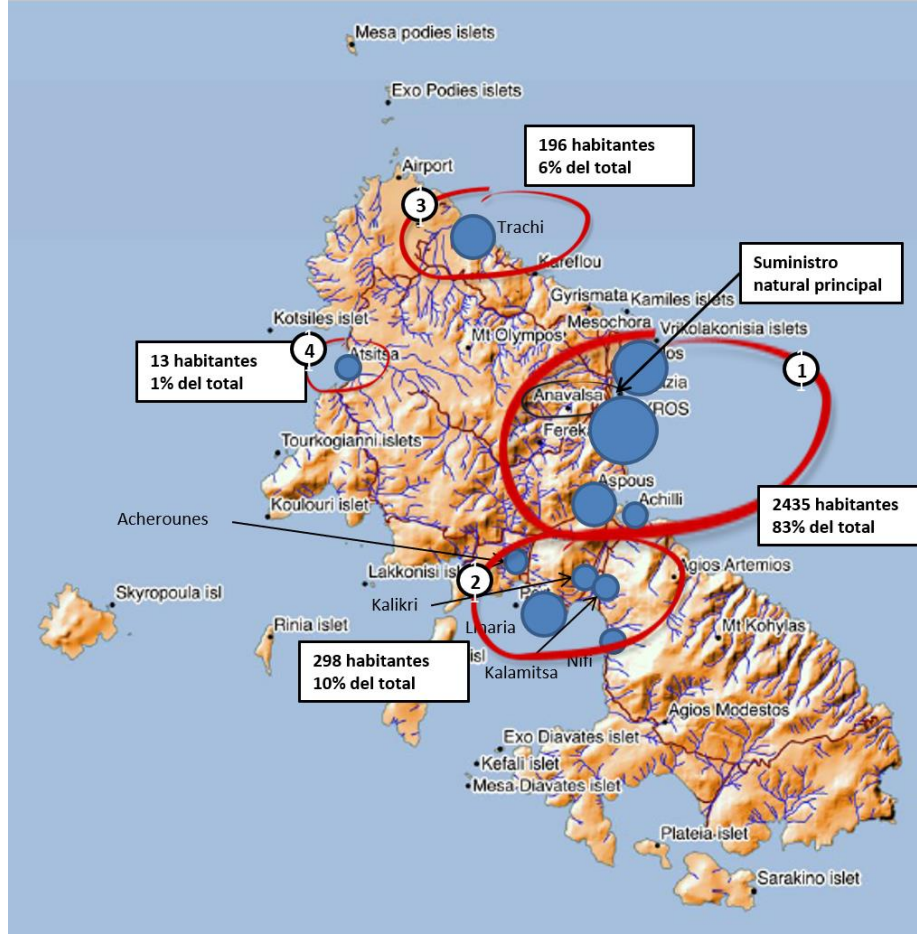


Fig. 3.1. Zonas hídricas en la isla.

La población generalmente crece de acuerdo a la ley de la tasa decreciente del aumento [13]. Esta ley sostiene que toda población tiene una población limitante y, por tanto, su velocidad de crecimiento es una función del déficit poblacional:

$$\frac{dP}{dt} = Kd(S - P) \quad (3.1)$$

Donde Kd es constante, S es la población de saturación y P es la población actual. Kd es calculada según la siguiente expresión.

$$Kd = \frac{-\ln\left(\frac{S - P_2}{S - P_1}\right)}{t_2 - t_1} \quad (3.2)$$

Kd ha de ser calculada para un espacio de tiempo determinado. Este proceso se repite para varios espacios temporales diferentes con el objetivo de calcular un Kd medio.

Finalmente, una vez estimada Kd se puede calcular la población futura a través de la expresión 3.3 [14].

$$P_2 = P_1 + (S - P_1)(1 - e^{-\overline{Kd}(t_2 - t_1)}) \quad (3.3)$$

En el caso de Skyros, la variable S (población de saturación) es desconocida y por tanto se optó por un procedimiento alternativo basado en el anterior para definir la población futura. Tomando como referencia los datos de los censos poblacionales para los años 1991, 2001 y 2011 [8] se generaron dos casos diferentes con un intervalo temporal de 10 años. En primer lugar, para cada caso se calculó Kd tomando como variable S (única variable restante) un número aleatorio, igual para ambos casos, y se obtuvo su media. Introduciendo las variables en la expresión 3.3 se obtuvo P_2 . Se llevaron a cabo una serie de iteraciones hasta alcanzar el valor de la variable S que proporcionaba los valores de P_2 más cercanos a la población correcta. Para una mejor explicación del procedimiento, se adjuntan las tablas III y IV.

TABLA III.
CASO I Y CASO II USADOS PARA ITERAR.

| CASO I | | CASO II | |
|----------------------|------|----------------------|------|
| T₁ | 1991 | T₁ | 2001 |
| T₂ | 2001 | T₂ | 2011 |
| P₁ | 1806 | P₁ | 2602 |
| P₂ | 2602 | P₂ | 2994 |

TABLA IV.
ITERACIONES SUCESIVAS.

| S | Kd₁ | Kd₂ | \overline{Kd} | P_{2prueba} (caso I) | P_{2prueba} (caso II) | P_{2casoI}- P_{1prueba} | P_{2casoII}- P_{2prueba} | Diferencia total |
|-------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|---|--|--|---|-----------------------------|
| 3000 | 0.11 | 0.42 | 0.26 | 2915.36 | 2971.79 | 313.36 | 22.21 | 335.57 |
| 3100 | 0.10 | 0.15 | 0.13 | 2729.64 | 2957.47 | 127.64 | 36.53 | 164.17 |
| 3200 | 0.08 | 0.11 | 0.10 | 2664.12 | 2970.12 | 62.12 | 23.88 | 86.00 |
| 3300 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 2623.86 | 2984.11 | 21.86 | 9.89 | 31.75 |
| 3400 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 2595.535 | 297.26 | 6.45 | 3.26 | 9.73 |
| 3500 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 2574.17 | 3009.21 | 27.83 | 15.21 | 43.04 |

Una vez obtenida la variable S , se puede estimar cualquier población futura. Se calcularon entonces, las futuras poblaciones para los años comprendidos entre 2002 y 2038 y se representaron estos datos en una gráfica para comprobar su carácter decreciente como anuncia la ley de la tasa decreciente del aumento poblacional.



Fig. 3.2. Gráfico del crecimiento poblacional durante los años 2002 y 2038.

A la hora de calcular la demanda de agua futura no se puede tener solo en cuenta el aumento de la población ya que la demanda per cápita también aumenta con el crecimiento poblacional. Por tanto, se puede decir que el crecimiento del flujo necesario será exponencial durante un tiempo más largo. De este modo, la demanda puede ser representada por la siguiente expresión exponencial:

$$Q = Q_0 e^{\alpha t} \quad (3.4)$$

Donde Q es el caudal futuro en un tiempo t , Q_0 el caudal inicial, y α la tasa constante para el crecimiento del caudal [13]. De esta manera si tuviésemos los datos de las demandas para dos años diferentes se podría calcular esta tasa α . En el caso de Skyros, estos datos no estaban disponibles por lo que se asumió que esta demanda resultaba ser proporcional al crecimiento poblacional durante los 10 primeros años aumentando después de forma exponencial siguiendo la ecuación 3.4. Por tanto, el procedimiento llevado a cabo

consistió en modelar la curva, cambiando el valor de α para conseguir que esta fuese proporcional al crecimiento poblacional durante los primeros años. Según este procedimiento, α tomó un valor de 0.015. Esta demanda se calculó partiendo de los datos disponibles para el año 2,002 con una demanda de 6,300 m³/día. Finalmente, para el año 2,038 se obtuvo una demanda diaria de 10,812.56 m³.

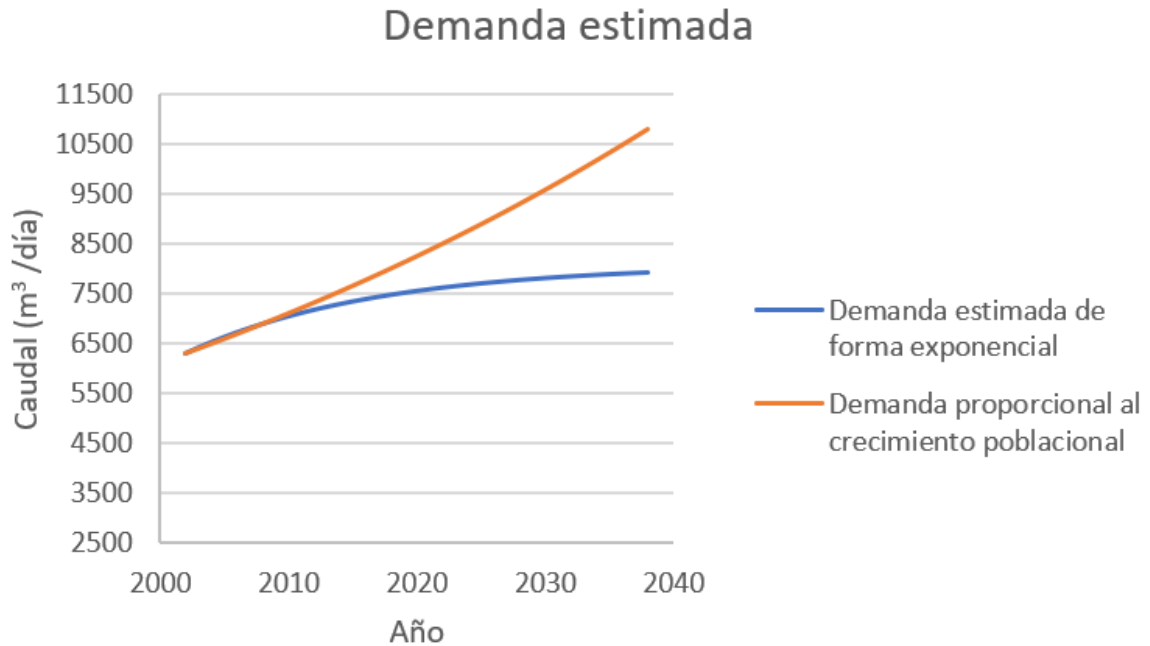


Fig. 3.3. Gráfico del crecimiento de la demanda durante los años 2002 y 2038

3.4 Sistema de coordenadas y mapa de altitudes

Con el objetivo de calcular las distancias entre ciudades e instalaciones se hizo uso de un sistema de coordenadas como se puede ver en la Fig. 3.4. En este mapa se posicionaron los diferentes puntos de la isla y con la ayuda de una hoja de cálculo se obtuvieron las distancias en la isla. Por otro lado, para el cálculo de las diferencias de altitud se hizo uso del mapa de la Fig.3.5.

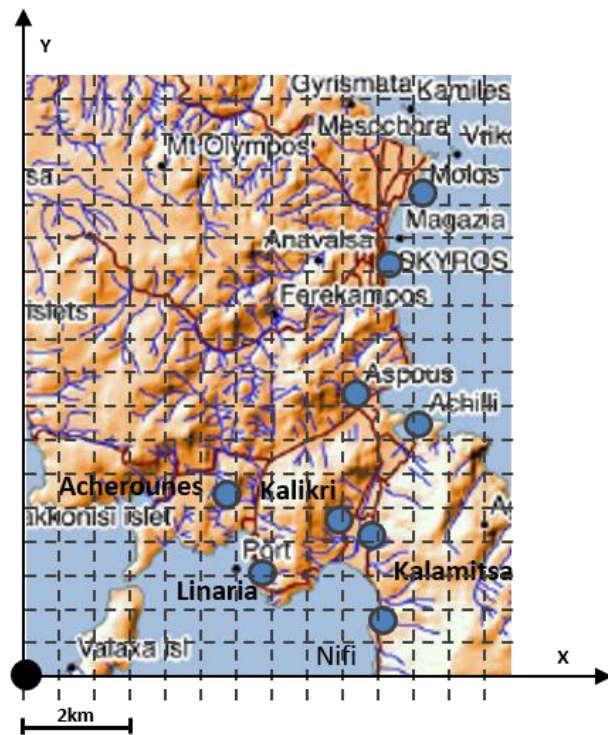


Fig. 3.4. Sistema de coordenadas



Fig. 3.5. Mapa de líneas de contorno cada 100m.

3.5 Ubicación de las diferentes infraestructuras.

A la hora de situar las diferentes infraestructuras (embalses, plantas de tratamiento de agua residual y desalinizadoras) se tuvieron en cuenta diferentes áreas señaladas como de importancia medioambiental que se pueden apreciar en la Fig. 3.6.

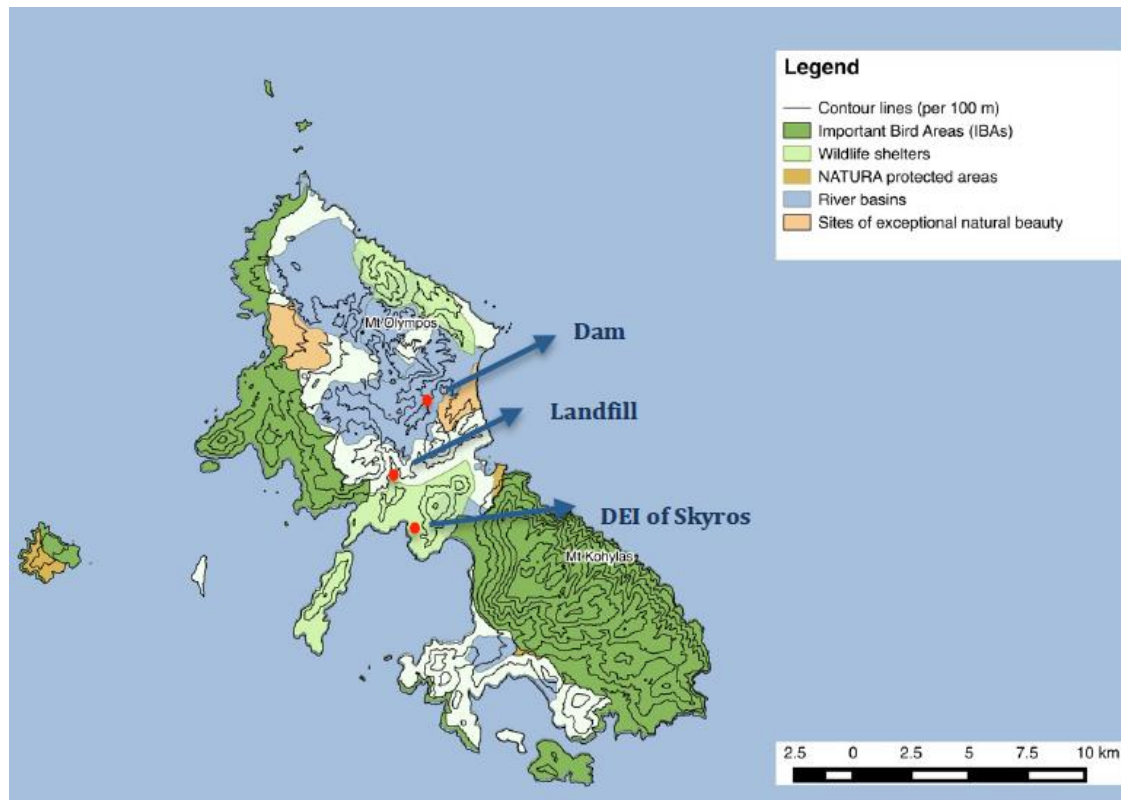


Fig. 3.6. Importantes zonas ambientales.

En primer lugar, las infraestructuras se intentaron ubicar en lugares no señalados por las zonas coloreadas, en los casos en los que no fue posible debido a las largas distancias infraestructura - población, se siguió el siguiente orden de preferencia ordenado de mayor a menor importancia:

1. Lugares de belleza natural excepcional (color salmón).
2. Áreas de protección NATURA (color naranja).
3. Importantes áreas para las aves (color verde oscuro).
4. Refugios de fauna salvaje (color verde claro).
5. Cuencas (color azul).

3.6 Alternativas para gestión del agua en la isla.

En áreas aisladas geográficamente, con escasez de recursos y creciente demanda de agua, existen pocas alternativas para la gestión del agua, estas quedan reducidas a las siguientes.

La primera opción a considerar cuando la demanda de agua supera la producción es obviamente la conservación del agua y el desarrollo de las fuentes existentes en la isla [15]. Si se va a llevar a cabo esta medida, la población debe de ser conocedora de las dimensiones del problema. Las autoridades locales deben educar a la población en los asuntos de conservación, así como llevar a cabo los ajustes necesarios en los precios para cubrir el menor beneficio debido a menor uso del recurso, y la posible imposición de multas en caso de un uso excesivo [16].

Por otro lado, la importación de agua es una práctica bastante común en las islas de mar Egeo ya que es el único modo de completar instantáneamente las necesidades de agua para el consumo humano. Sin embargo, este transporte está limitado por la capacidad y disponibilidad de los tanques para transportar agua, y en ocasiones, no se llega a cubrir adecuadamente esta demanda. Además, esta práctica implica el consumo de grandes cantidades de combustibles fósiles que, por tanto, representan un problema para el medio ambiente [16]. En la Tabla V se muestra la cantidad de agua importada a algunas de las islas del mar Egeo con su correspondiente coste económico asociado.

TABLA V.
CANTIDADES DE AGUA IMPORTADAS A ALGUNAS ISLAS EN METROS CÚBICOS POR AÑO

| ISLA | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | COSTE 2001 |
|-------------|---------|---------|---------|---------|------------|
| AMORGOS | 21,130 | 24,670 | 13,750 | 19,150 | 95,750 € |
| FOLEGANDROS | 2,250 | 10,170 | 12,730 | 16,520 | 82,600 € |
| HERAKLIA | 6,630 | 7,745 | 9,100 | 12,140 | 60,700 € |
| SYMI | 201,512 | 153,762 | 175,639 | 119,512 | 597,560 € |
| NISIROS | 44,778 | 52,394 | 80,108 | 78,360 | 391,800 € |

En tercer lugar, siendo salada la mayoría del agua accesible a nuestro alrededor, las tecnologías de desalinización son vitales para transformar esta agua procedente del mar en agua apta para el consumo humano, a pesar de su alta demanda energética. Actualmente, estos requisitos energéticos son cubiertos mediante combustibles fósiles ya sea a través de plantas térmicas o calderas, las cuales emiten grandes cantidades de gases

de efecto invernadero contribuyendo al cambio climático, así como la descarga de salmuera cargada de productos químicos que deterioran el ecosistema marino. Por tanto, es fundamental que ingenieros y científicos busquen procedimientos alternativos que sean de alguna manera más eficientes energéticamente o usen energías renovables para satisfacer la creciente demanda de agua desalinizada. Hoy, alrededor de un 1% del agua desalinizada en el mundo usa energías renovables. El uso limitado de estas fuentes puede ser atribuido a problemas como la falta de información, educación e investigación [17]. Aprovechando un estudio energético realizado en la isla en el que se propusieron diferentes escenarios basados en energías renovables [18], se presentaron varias alternativas de desalinización que usaban estas plantas como fuente energética.

Además, y en combinación con las diferentes alternativas anteriores, la recuperación y reutilización de aguas residuales puede ser usada para proporcionar agua a las islas. A largo plazo, esta alternativa puede tomar un papel bastante importante en el desarrollo de estrategias sostenibles para la gestión del agua en las islas del mar Egeo. Esta tecnología resulta más económica que muchas de las anteriores, incluso en el caso de algunas islas griegas donde el agua es tratada por encima de los estándares europeos [16].

El agua regenerada puede ser definida como “agua que como resultado de un tratamiento es apta para una serie de usos que de otra manera no ocurrirían”. Por tanto, la aplicación para la que esta agua es tratada marcará la calidad necesaria [19]. Las aplicaciones que tienen contacto con el usuario final requieren de una producción de agua de mayor calidad que las que no tienen contacto directo. Uno de los factores principales para el uso efectivo del agua regenerada es la proximidad de la planta al lugar donde esta agua va a ser usada finalmente. Esto es debido a que el bombeo de agua regenerada a través de largas distancias no es en ninguno de los casos sostenible o viable económicamente [20]. Por tanto, siendo la agricultura una de las actividades que más agua demandan y una de las aplicaciones para las que esta agua reutilizada puede ser usada, se decidió satisfacer la demanda de riego de las dos de principales ciudades de la Isla a partir de esta agua reutilizada (por su proximidad a las plantas de tratamiento).

3.7 Análisis de la calidad de agua de Anavalsa.

Según lo comentado en el apartado anterior y con el objetivo de hacer uso de la única fuente natural disponible, se procedió a estudiar la calidad del agua de Anavalsa (ya que Nifaki se desestimó por su reducido caudal). Para ello se hizo uso de diferentes muestras

tomadas del río y se compararon con los parámetros mínimos para el consumo humano establecidos por la Directiva Europea (ANEXO A). Esta agua cumple con los estándares mínimos excepto en las cantidades presentes de cianuro y cloruro y que, por tanto, habrá que disminuir antes de ser suministrada a los consumidores.

El cianuro es una sustancia muy tóxica para los humanos y los organismos acuáticos. Es un potente inhibidor de la respiración debido a su extrema toxicidad hacia la citocromo oxidasa y la capacidad de unirse fuertemente a la oxidasa terminal. Se propuso tratar esta agua mediante carbón activo granular (GAC) con la que se consiguió una absorción de hasta 1 mg/L [21].

Por otro lado, el cloruro se decidió tratar mediante biomasa seca de hojas de *Parthenium* spp. con agitación mecánica. Este método resulta ser más económico que otras tecnologías como la desmineralización, intercambio iónico, coagulación, precipitación y otros tratamientos similares [22].

4. DISEÑO DE LA RED

4.1 Principios básicos del flujo en tuberías.

El transporte a través de tuberías es el método más utilizado para trasladar fluidos desde un punto a otro ya sea a través de pequeñas o moderadamente largas distancias. En los casos de flujo en tuberías, el fluido completa toda la sección transversal de la tubería. Normalmente, la presión del fluido es mayor que la presión atmosférica, pero en algunos casos puede ser menor. Sin embargo, si la presión del fluido es mucho menor que la atmosférica, los gases disueltos en el fluido pueden hacer que el flujo se detenga [13].

El flujo de la tubería es analizado usando la ecuación de continuidad y la ecuación de movimiento. La ecuación para flujo estacionario en una tubería circular de diámetro D es:

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 V \quad (4.1)$$

Donde V es la velocidad media del fluido, y Q el caudal. La ecuación del movimiento para flujo estacionario es:

$$z_1 + h_1 + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + h_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_L \quad (4.2)$$

Donde z_1 y z_2 son alturas del punto central de la tubería para los puntos 1 y 2, h_1 y h_2 son las alturas manométricas, V_1 y V_2 las velocidades medias en las secciones 1 y 2. La pérdida de carga h_L está compuesta de dos partes; h_f que representa la pérdida de carga correspondiente a la resistencia superficial, y h_m la pérdida de carga debida a la forma de la tubería. Por tanto h_L queda representada por la siguiente ecuación:

$$h_L = h_f + h_m \quad (4.3)$$

Donde la pérdida de carga producida por la forma de la tubería (h_m) puede ser despreciada para largos sistemas de transporte [13] y por tanto fue despreciada en el presente proyecto.

La pérdida de carga debida a la resistencia superficial viene dada por la ecuación de Darcy – Weisbach;

$$h_f = \frac{f L Q^2}{2gD} \quad (4.4)$$

Donde L es longitud de la tubería y f el coeficiente de fricción. Eliminando V combinando las ecuaciones 4.1 y 4.4 se obtiene la siguiente ecuación:

$$h_f = \frac{8fLQ^2}{\pi^2 g D^5} \quad (4.5)$$

El factor de fricción depende de la rugosidad de la tubería ε . En la tabla VI se pueden encontrar las rugosidades medias para cada tipo de material [13].

TABLA VI.
RUGOSIDAD PARA DIFERENTES MATERIALES [13].

| MATERIAL DE LA TUBERÍA | RUGOSIDAD (MM) |
|--------------------------|----------------|
| HIERRO FORJADO | 0.04 |
| FIBROCEMENTO | 0.05 |
| PVC | 0.05 |
| ACERO | 0.05 |
| HIERRO FUNDIDO ASFÁLTICO | 0.13 |
| HIERRO GALVANIZADO | 0.15 |
| HIERRO DÚCTIL | 0.25 |

Además de depender de la rugosidad de la tubería, el factor de fricción también depende del número de Reynolds definido como:

$$R = \frac{VD}{\nu} \quad (4.6)$$

Eliminando V mediante las ecuaciones 4.1 y 4.5 la expresión del número de Reynolds queda reducida a:

$$R = \frac{4Q}{\pi \nu D} \quad (4.7)$$

Para el correcto desarrollo del proyecto fue necesario el uso de una expresión para el cálculo del factor de fricción válida para cualquier condición en la que se encontrase el fluido (régimen laminar, transición o turbulento). Por ello, se tomó la expresión aportada por Swamee que combinaba la ecuación de Colebrook para régimen turbulento y la aportada por Hagen – Poiseuille para régimen laminar, además de aportar la componente

que faltaba sobre el régimen de transición. La fórmula dada por Swamee fue la siguiente [13]:

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{R} \right)^8 + 9.5 \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{R^{0.9}} \right) - \left(\frac{2500}{R} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0.125} \quad (4.8)$$

4.2 Problemas del flujo en tuberías.

4.2.1 Caudal.

Para tuberías largas, las pérdidas causadas por la forma pueden ser despreciadas. Por tanto, en caso de saber las variables L , D , h_f , ε y ν . Swame dio la siguiente expresión que es válida para bajo las condiciones de flujo laminar, transitorio y turbulento [13]:

$$Q = D^2 \sqrt{\frac{gDh_f}{L}} \left\{ \left(\frac{128\nu}{\pi D \sqrt{gDh_f/L}} \right)^4 + 1.153 \left[\left(\frac{415\nu}{D \sqrt{gDh_f/L}} \right)^8 - \ln \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{1.775\nu}{D \sqrt{gDh_f/L}} \right) \right]^{-4} \right\}^{0.25} \quad (4.9)$$

4.2.2 Diámetro.

En este problema, las variables conocidas son L , Q , h_f , ε y ν . Para el caso de un medio de bombeo, la altura manométrica no es conocida, y a la hora de diseñar el sistema se debe calcular de tal manera que se optimicen los costes. Por ello Swamee tras su estudio llegó a la siguiente expresión válida para flujos bajo condiciones laminares, de transición y turbulentas [13]:

$$D = 0.66 \left[\left(214.75 \frac{\nu L Q}{g h_f} \right)^{6.25} + \varepsilon^{1.25} \left(\frac{L Q^2}{g h_f} \right)^{4.75} + \nu Q^{9.4} \left(\frac{L}{g h_f} \right)^{5.2} \right]^{0.04} \quad (4.10)$$

4.3 Líneas de transmisión.

El agua como cualquier otro líquido precisa de ser transportada largas distancias a través de tuberías. Existen dos tipos de transporte de agua a través de tuberías. En primer lugar, si el flujo de una línea de transmisión se mantiene creando una altura manométrica

mediante bombeo, esta es llamada transporte por bombeo. De otra manera, si el flujo se mantiene gracias a la diferencia de elevación entre dos puntos, este se llama transporte por gravedad.

4.3.1 Transporte por gravedad.

En la figura 4.1 se muestra un sistema de transporte por gravedad. Debido a que la altura manométrica h_0 (debida a la altura de la columna de agua almacenada en el tanque) varía con el tiempo, no fue incluida en los cálculos [13]. Además, despreciando las pérdidas de entrada y salida, la expresión para la pérdida de carga de la tubería quedó reducida a la siguiente:

$$h_L = z_0 + z_L - H \quad (4.11)$$

Usando las ecuaciones 4.10 y 4.11 el diámetro óptimo para un sistema de transporte por gravedad viene dado por la siguiente ecuación:

$$D = 0.66\{\varepsilon^{1.25}\} \left[\left(214.75 \frac{\nu L Q}{g h_f} \right)^{6.25} + \varepsilon^{1.25} \left(\frac{L Q^2}{g h_f} \right)^{4.75} + \nu Q^{9.4} \left(\frac{L}{g h_f} \right)^{5.2} \right]^{0.04} \quad (4.12)$$

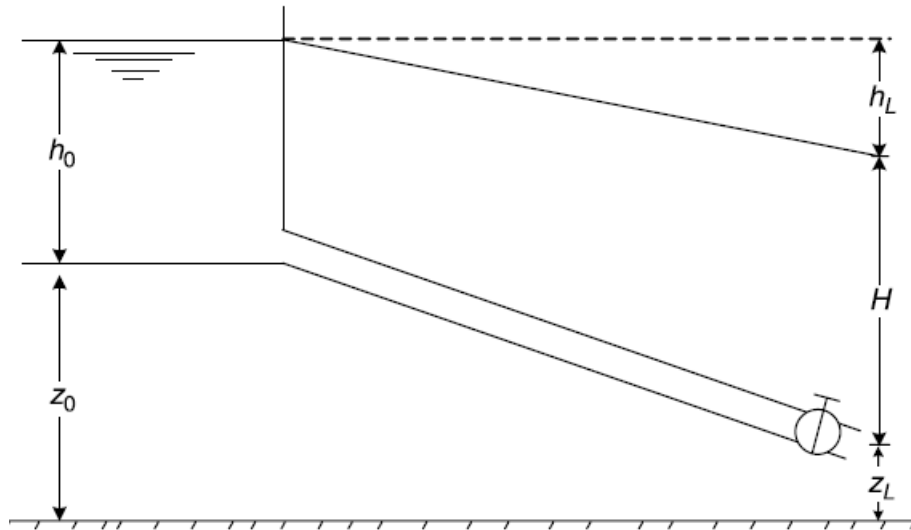


Fig. 4.1. Esquema transporte de agua por gravedad [13].

4.3.2 Transporte por bombeo.

La determinación de las dimensiones óptimas de un sistema de transporte por bombeo ha llamado la atención de ingenieros desde la invención de la bomba [13]. Existen dos métodos para determinar las dimensiones óptimas del sistema. Por un lado, el diseño iterativo asume un valor constante para el factor de fricción y por otro, el método explícito de diseño, que consiste en la obtención de una expresión para el diámetro óptimo eliminando el factor de fricción y ajustando la curva al introducir las variables de entrada.

El método que se usó para los cálculos del proyecto fue el diseño por iteración. La función objetivo que se deseaba minimizar era la siguiente:

$$F = k_m L D^m + k_T \rho g Q h_0 + \lambda \left(\frac{8 f L Q^2}{\pi^2 g m k_m} - h_0 - z_0 + H + z_L \right) \quad (4.13)$$

Por tanto, con el objetivo de minimizar la ecuación, su derivada parcial respecto de D , h_0 y λ debía ser 0. Tras derivar parcialmente F respecto de D y h_0 y eliminando λ entre las ecuaciones obtenidas, la expresión para el diámetro óptimo conseguida fue la expresada por la ecuación 4.14:

$$D = \left(\frac{40 \lambda k_T \rho f Q^3}{\pi^2 m k_m} \right) \quad (4.14)$$

Una vez calculado el diámetro óptimo para este valor del factor de fricción supuesto, se calcula el valor del factor de fricción dado por la ecuación 4.8. Si el factor de fricción coincide con el supuesto constante en un principio, los cálculos son correctos. En caso contrario se deberá iterar hasta conseguir un valor similar.

4.3.3 Elección de transporte por gravedad o por bombeo.

El transporte de agua por bombeo puede ser usado para cualquier configuración topográfica. Sin embargo, el transporte de agua por gravedad necesita de una diferencia de alturas entre los puntos 1 (entrada) y 2 (salida). Si esta diferencia es demasiado pequeña puede que el sistema no sea económicamente viable ya que los diámetros necesarios son demasiado grandes [13]. En el caso de Skyros todas las configuraciones, en las cuales se podía hacer uso de sistemas de gravedad, contaban con diferencias de altura mayores de 60 metros, suficientemente grandes como para que este sistema fuese viable. De este modo, en las configuraciones con una diferencia de alturas positiva se optó por sistemas de gravedad y en el resto se usaron sistemas de transporte por bombeo.

4.4 Elección del material de construcción.

Las tuberías frecuentemente representan una parte considerable de la inversión y por tanto la selección del material de estas es importante. Los materiales disponibles son varios, los más comunes son hierro fundido, hierro dúctil, acero, fibrocemento, PVC y polietileno. Los factores que se tuvieron en cuenta a la hora de seleccionar el material fueron los siguientes:

- Coste y disponibilidad del material.
- La presión de diseño.
- La corrosividad del agua a transportar y del suelo en el que las tuberías van a ser enterradas.

El hierro dúctil y el acero son los materiales más fuertes, convirtiéndolos en la mejor elección cuando se va a operar con altas presiones. En relación con los costes de inversión, el hierro dúctil es considerado como la mejor alternativa frente al hierro fundido debido a la larga durabilidad de este material. La tubería es prácticamente resistente a la corrosividad.

Comparado con los materiales metálicos, los fibrocementos son más ligeros y fáciles de manejar. Sin embargo, este material no puede ser usado para líneas de transmisión ya que no existen intervenciones autorizadas para este tipo de material.

Las tuberías de PVC tienen la ventaja de ser fáciles de manejar y su resistencia a la corrosión es buena. No obstante, pueden sufrir pérdidas de calidad cuando son expuestas a la luz del sol bajo largos periodos.

En resumen, para tuberías de diámetro pequeño (menor de 0.1 m) PVC y PE son la mejor alternativa a no ser que se vaya a operar con grandes presiones. Por otro lado, las tuberías de hierro fundido, hierro dúctil y acero son generalmente usadas para grandes diámetros y para casos en los que se va a trabajar con grandes presiones. Debido al peso y a su mayor ductilidad, el hierro dúctil se ha posicionado por delante del hierro fundido a pesar de sus mayores precios [23]. Por tanto, el material que se seleccionó para trabajar en el transporte de agua fue el hierro dúctil.

4.5 Funciones de costes.

El coste de una estación de bombeo con todos los accesorios y construcción es proporcional a la potencia realizada [13]:

$$C_p = k_p P^{m_p} \quad (4.15)$$

Donde la potencia está expresada en kW, k_p es el coeficiente para el coste de la estación, y m_p un exponente. La potencia de la bomba viene dada por la siguiente expresión:

$$P = \frac{\rho g Q h_0}{1000 \eta} \quad (4.16)$$

Donde ρ es la densidad del fluido y η el rendimiento del sistema de bombeo. Para el caso de Skyros donde el suministro de electricidad es llevado a cabo por plantas locales, el rendimiento del sistema de bombeo fue calculado como:

$$\eta = \eta_H \eta_V \eta_M \eta_E \quad (4.17)$$

Donde los rendimientos usados son hidráulico, volumétrico, mecánico y eléctrico sucesivamente. Finalmente, el rendimiento usado para los cálculos tenía un valor de 83%.

Los parámetros k_p y m_p varían espacial y temporalmente. Mientras que k_p depende de la inflación, m_p depende mayormente del material y la tecnología de construcción. Samra y Essery propusieron un método en el que, a partir de una serie de datos de capacidades de bombeo y precios, se podían obtener las variables k_p y k_m para una configuración determinada. De este modo, se proporcionó una ecuación para obtener el coste en función de la potencia suministrada:

$$C_p = 5560 P^{0.723} \quad (4.18)$$

Normalmente, las tuberías son enterradas a 1 m de profundidad. La amplitud de la zanga suele ser de 60 cm más el diámetro de la tubería [13]. Este criterio puede variar dependiendo de la maquinaria usada. El coste de una tubería completa incluyendo equipamiento y accesorios sigue la siguiente ecuación dependiente de la longitud (L) y el diámetro (D) de la tubería:

$$C_m = k_m L D^m \quad (4.19)$$

Los parámetros k_m y m depende del material de construcción, la moneda y la economía del país. Sharma definió estos parámetros para el hierro dúctil, creando dos ecuaciones para dos rangos de diámetros diferentes; 0.08m - 0.2m y 0.25m - 0.75m. Estas dos ecuaciones quedan simplificadas en una sola que aplica para ambos rangos:

$$C_m = 1320D^{0.866} \left[1 + \left(\frac{D}{0.2} \right)^{9.7} \right]^{0.08} \quad (4.20)$$

La función de coste para un embalse de superficie de hormigón fue desarrollada por Samra y Essery. Usando métodos analíticos se llegó a la siguiente expresión [13]:

$$C_R = \frac{290V_R}{\left[1 + \left(\frac{V_R}{1100} \right)^{5.6} \right]^{0.075}} \quad (4.21)$$

Donde V_R es la capacidad del embalse en m^3 .

4.6 Unificación de costes.

Los costes de bombas, edificios, embalses, plantas de tratamiento, y tuberías son costes efectuados en el momento de la construcción del sistema de suministro de agua, mientras que los costes energéticos y de mantenimiento se efectúan cada año. Por tanto, existen dos tipos de costes; costes fijos de inversión y costes periódicos [13].

Estos dos tipos de costes no pueden ser sumados directamente a la hora de calcular el coste total para la vida del proyecto. Los costes tienen que ser llevados a las mismas unidades para poder ser añadidos. Existen tres tipos de métodos para ello: método de capitalización, método de anualidad y el valor neto actual.

El método elegido para los cálculos del proyecto fue el de anualidad. Este método convierte los costes fijos de inversión en costes periódicos. La inversión se asume incurrida mediante un préstamo que ha de ser devuelto en partes iguales durante la vida del proyecto. Una vez obtenido el valor de estas partes anuales se pueden sumar a los costes periódicos para obtener el coste anual total de la inversión.

Si una serie de plazos anuales A_r para el pago del sistema son depositados en un banco hasta un total de T años, el primer plazo crecerá hasta $A_r (1+r)^{T-1}$, el segundo plazo será $A_r (1+r)^{T-2}$ y así sucesivamente. Sumando las series geométricas se llega a la siguiente expresión:

$$C_a = A_r \frac{(1+r)^T - 1}{r} \quad (4.22)$$

Por otro lado, un componente tiene una vida útil mayor que el periodo de diseño del proyecto, por ello el componente tendrá un coste menor (C_N) que el original (C_0) ya que la posible venta de este mismo proporcionaría unos ingresos. Por tanto, el pasivo neto (C_N) del componente puede ser calculado como:

$$C_N = (1 - \alpha)C_0 \quad (4.23)$$

Usando las ecuaciones 4.22 y 4.23 se obtiene A_r a través de la siguiente ecuación:

$$A_r = \frac{(1 - \alpha)r}{(1 + r)^T - 1} C_0 \quad (4.24)$$

La anualidad A_0 para la inversión inicial es dada por:

$$A_0 = rC_0 \quad (4.25)$$

Añadiendo A_0 , A_r , y coste de mantenimiento anual βC_0 la anualidad A resulta como:

$$A = rC_0 \left[1 + \frac{1 - \alpha}{(1 + r)^T - 1} + \frac{\beta}{r} \right] \quad (4.26)$$

Esta fue la fórmula usada para calcular las anualidades de los costes periódicos durante el proyecto.

4.7 Parámetros elementales para el dimensionamiento de la red.

El diámetro mínimo y máximo que se utilizó como uno de los limitantes del sistema proviene de las especificaciones del material utilizado, hierro dúctil, para la construcción de las tuberías. Como ya vimos en la ecuación 4.16, la expresión aportada por la referencia [13] es válida para diámetros comprendidos entre 0.08 y 0.75 m que, por tanto, se convirtieron en los límites del sistema.

Para el caso de los límites establecidos por las velocidades mínima y máxima, experimentos realizados por la Utah State demostraron que las velocidades óptimas, para el transporte de agua en tuberías de hierro dúctil, se encuentran dentro del rango de 0.5 a 4 m/s [24]. Si la velocidad máxima se supera se deberá aumentar el diámetro de la tubería para así disminuir esta velocidad del fluido.

Además de los límites aportados por diámetro y velocidad, se comprobó que el diseño cumplía también con los límites de mínima y máxima altura manométrica. La altura manométrica para una distancia x desde la fuente se calcula como [13]:

$$h_x = z_0 + h_0 - z_x - 1.07 \frac{xQ^2}{gD^5} \left\{ \ln \left[\frac{\varepsilon}{3.7D} + 4.618 \left(\frac{\nu D}{Q} \right)^{0.9} \right] \right\}^{-2} \quad (4.27)$$

La mínima presión permitida es -2.5 m. Esta presión asegura que el aire disuelto en el agua no dificulta el flujo del agua a través de las tuberías [13]. La altura manométrica no debe superar en ningún caso los 50 m [25]. Si esta presión máxima se supera se deberán instalar tanques intermedios dividiendo el medio de transporte por gravedad en dos [13].

Se han definido los límites de funcionamiento para el sistema, por otro lado, se decidió sobredimensionar el sistema para el peor escenario posible. Para ello se hizo uso de una serie de factores máximos (factor máximo horario y factor máximo diario) que aumentaban la demanda instantánea. Para ello se hizo uso de la siguiente tabla:

TABLA VII.
FACTORES MÁXIMOS DIARIOS Y HORARIOS SEGÚN LA POBLACIÓN [13] .

| FACTOR MÁXIMO DIARIO |
|---|
| 1.5 para poblaciones mayores de 10,000 habitantes |
| 2 para poblaciones por debajo de 2,000 habitantes |
| FACTOR MÁXIMO HORARIO |
| 2 para poblaciones mayores de 10,000 habitantes |
| 5 para poblaciones menores de 2,000 habitantes |

Según la tabla anterior para todas las poblaciones de Skyros (con una población menor de 2,000 habitantes) se debe hacer uso de un factor máximo diario de 2 y un factor máximo horario de 5. De este modo las demandas máximas diarias y horarias se calcularon de la siguiente manera:

$$Demanda\ máxima\ diaria = Demanda\ media\ diaria \times Factor\ máximo\ diario \quad (4.28)$$

$$\begin{aligned} &Demanda\ máxima\ horaria \\ &= Demanda\ máxima\ horia\ en\ el\ día\ máximo \times Factor\ máximo\ horario \end{aligned} \quad (4.29)$$

Se decidió hacer las siguientes suposiciones referentes al caudal:

- Para dimensionar las tuberías de aporte de agua, se usó la demanda horaria máxima, ya que el sistema tiene que ser capaz de cubrir la demanda en el peor de los casos.
- El caudal por tratar en la planta de tratamiento fue el calculado para el día máximo usando el factor de máximo diario.
- Para el caso de la desalinizadora, se decidió que se produciría una cantidad de agua igual al caudal medio diario que es necesario aportar al embalse.

5. DESALINIZACIÓN

La desalinización o desalación es el proceso de eliminar la sal del agua de mar o salobre, obteniendo agua dulce. Las plantas desalinizadoras o desaladoras son instalaciones industriales destinadas a la desalinización. Para la desalinización podemos tomar agua del mar o bien aguas salobres para su utilización como agua bruta o agua de alimentación. Esta agua es sometida a un proceso de permeado o a un proceso de desalinización por evaporación y se obtiene por un lado agua lista para el consumo (aunque necesite un post tratamiento) y un producto de rechazo que es la salmuera. La salmuera es agua con un alto contenido en sales y se vierte de nuevo al mar [26]. En la siguiente tabla se muestran los principales procesos de desalinización que existen y que tipo de energía utilizan:

TABLA VIII.
MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN [27].

| Separación | Energía | Proceso | Método |
|---------------|-----------|--------------------------|----------------------------|
| Agua de sales | Térmica | Evaporación | Destilación súbita (Flash) |
| | | | Destilación multiefecto |
| | | | Termocompresión de vapor |
| | | | Destilación solar |
| | | Cristalización | Congelación |
| | | | Formación de hidratos |
| | | Filtración y evaporación | Destilación con membranas |
| Sales de agua | Mecánica | Evaporación | Compresión mecánica vapor |
| | | Filtración | Osmosis Inversa |
| | Eléctrica | Filtración selectiva | Electrodialisis |
| | Química | Intercambio | Intercambio iónico |

5.1 Salinidad y temperatura del agua.

Existen 3 estaciones medidoras de las características del mar Egeo y son las que aparecen en la figura 5.1. Por su proximidad a Skyros, se consideró que las mediciones tomadas por la estación de Athos eran aplicables para la isla bajo estudio. El periodo de medición del agua para la estación de Athos es entre enero de 2008 hasta octubre de 2010.



Fig. 5.1. Estaciones medidoras.

La Fig. 5.2 representa la temperatura a diferentes profundidades en la estación de Athos. Para el cálculo de la temperatura media a una profundidad de 20m se hizo de la siguiente expresión para calcular el valor promedio de una función (considerando la gráfica dada como una función) [31]:

$$f_{prom} = \frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx \quad (5.1)$$

Para calcular el área bajo la función (integral), se hizo uso de figuras geométricas aproximadas para agilizar los cálculos. Siendo $a=0$ y $b=12$ (número de meses) se calculó

un valor medio de 18° para la temperatura. Para el caso de la salinidad del agua (Fig. 5.9) se siguió el mismo procedimiento obteniendo un valor medio de 37.5 psu.



Fig. 5.2. Temperatura del agua.

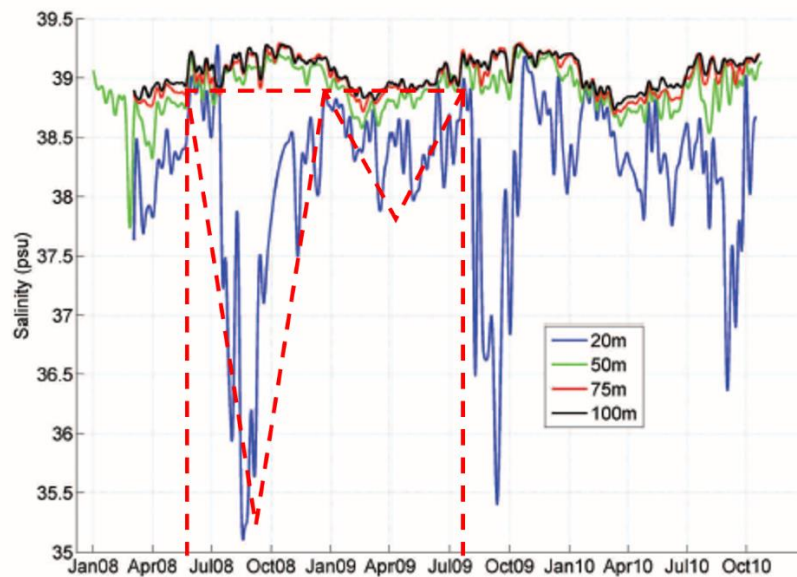


Fig. 5.3. Salinidad del agua.

5.2 Metodología.

Para evaluar los diferentes costes correspondientes al proceso de desalinización se hizo uso de un *software* llamado *Desalination Economic Evaluation Program* (DEEP). Este programa es una hoja de cálculo desarrollada por IAEA en nombre de General Atomics [28]. Permite a diseñadores y tomadores de decisiones comparar el funcionamiento y estimar costes de diferentes configuraciones energéticas y de desalinización. Las diferentes alternativas de desalinización que incluye el modelo son MSF (Destilación súbita Flash), MED (Destilación multiefecto), TVC (Termocompresión de vapor) y RO (Ósmosis inversa). En el lado de la producción energética las opciones disponibles son plantas del tipo; vapor, gas, ciclo combinado y solo calor, con combustibles como nuclear, petróleo y carbón. La idea del proyecto consistió en proporcionar esta agua desalinizada mediante energías renovables y por tanto las simulaciones se realizaron con el aporte de calor de las plantas de energía renovable (CSP y PV).

5.3 Tecnologías incluidas.

Todo proceso de desalinización necesita energía. Este calor puede ser extraído del vapor producido por la quema de combustibles fósiles o de una planta nuclear así como de numerosas fuentes donde se puede aprovechar calor del sistema. La electricidad requerida por todos los procesos de desalinización puede ser tomada de una central eléctrica o de la red. DEEP está diseñado para calcular estas necesidades energéticas y el coste de producción de esta agua producto como se muestra en la Fig.5.4 [28].

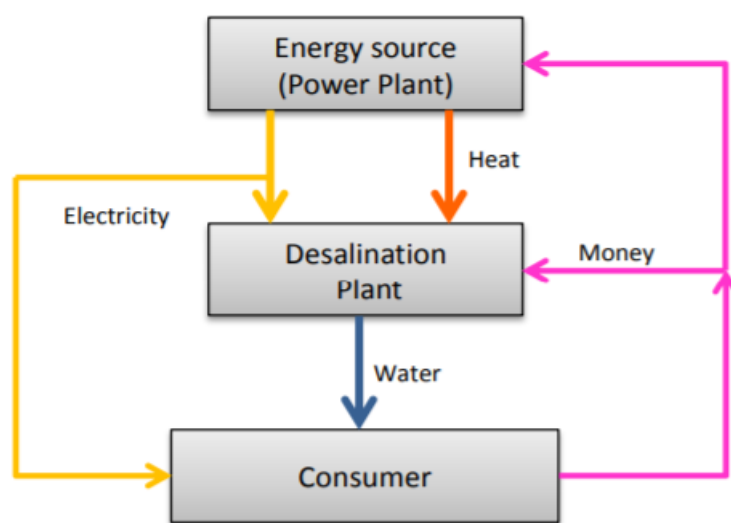


Fig. 5.4. Esquema del funcionamiento de DEEP

5.3.1 Destilación súbita Flash (MSF).

En el proceso de destilación súbita, ilustrado en la Fig. 5.5, el agua de mar se calienta en el calentador de salmuera mediante la condensación de vapor en un intercambiador inicial por el que se hace circular el agua de mar. Posteriormente el agua de mar caliente se hace pasar a la primera etapa a una presión ligeramente inferior, en la cual se produce su súbita ebullición parcial. El vapor producido se condensa en el haz tubular por donde circula el agua de mar hacia el calentador de salmuera, recogiendo el condensado como agua producto y conduciendo el resto hacia el siguiente efecto donde al existir una presión inferior, se repite el ciclo. Operan con una temperatura de salmuera no superior a $110\text{ }^{\circ}\text{C}$, debido a que a partir de tal temperatura comienza a producirse corrosión en las superficies metálicas de intercambio; este hecho hace que la eficiencia térmica de las plantas quede en la práctica limitada por la temperatura de operación [29].

Las plantas MSF necesitan un pretratamiento del agua de mar para evitar incrustaciones añadiendo ácido o algunos químicos avanzados. Si los materiales usados para la construcción de los evaporadores son de baja calidad, se debe instalar un desaierador adicional. Los gases resultado de la desaieración junto con los gases no condensables liberados durante el proceso de evaporación flash, se eliminan mediante eyectores de chorro de vapor y se descargan directamente a la atmósfera [28]. Este tipo de plantas son relativamente fáciles de construir y operar, además no cuentan con partes móviles más allá de las convencionales como las bombas. La calidad del agua de salida es bastante alta alcanzando una cantidad de sólidos disueltos de entre 2 y 10 ppm. A pesar de todas las ventajas comentadas, su alta demanda energética lo descarta para futuros proyectos que buscan procesos más eficientes energéticamente [30].



Fig. 5.5. Diagrama de planta de destilación súbita Flash (MSF) [29]

5.3.2 Destilación multiefecto (MED).

El proceso de destilación multiefecto (Fig. 5.6), como el anterior, se realiza en etapas sucesivas y utiliza el principio de reducción sucesiva de presión anteriormente citado. El agua de mar se introduce en el primer efecto, donde se calienta hasta su punto de ebullición mediante vapor procedente del exterior, produciéndose su evaporación parcial; el resto del agua es alimentada al siguiente efecto, donde existe una presión inferior y donde se produce de nuevo su parcial evaporación, al ser aplicada a un haz de intercambio por el que circula el vapor procedente del efecto anterior. Tal cesión de calor hace que el citado vapor se condense, pasando a formar parte del agua producto, y el nuevo vapor producido se conduce al siguiente efecto, donde prosigue el ciclo de desalación [29].

Actualmente, los MED con el mayor potencial técnico y económico son los llamados procesos multiefecto de tubos horizontales a baja temperatura (LT-HTME) y los procesos de evaporación en tubos verticales (VTE). En los procesos LT-HTME, los tubos evaporadores están situados horizontalmente y la evaporación tiene lugar vertiendo la salmuera sobre la parte exterior de estos tubos horizontales creando una fina capa que favorece la evaporación. En los procesos VTE, la evaporación tiene lugar dentro de los tubos verticales [28]. La demanda energética de este tipo de plantas es mucho menor que la de las plantas MSF. Por tanto, el rendimiento de estas plantas es mucho mayor [30].

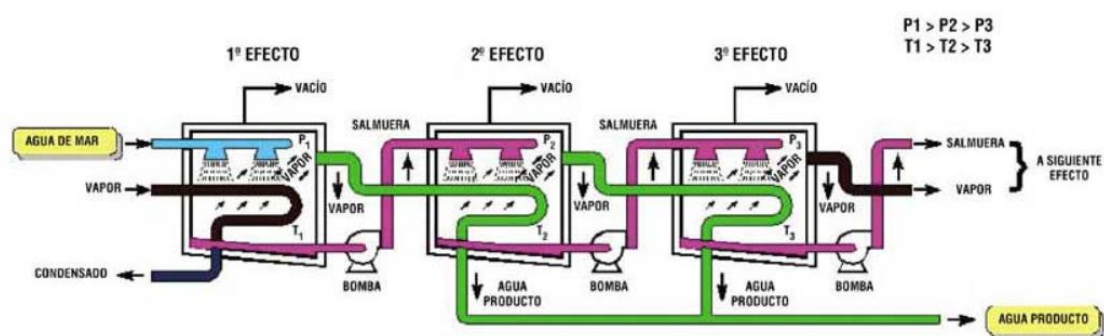


Fig. 5.6. Diagrama de planta de destilación multiefecto (MDE) [29]

5.3.3 Termocompresión de vapor (TVC).

En algunos diseños de plantas MED (Fig. 5.7), una parte del vapor producido en la última etapa es comprimido hasta una temperatura mayor, y por tanto la eficiencia de la planta

[illegible]

La ósmosis es un fenómeno natural que se produce cuando agua procedente de una solución menos concentrada pasa, a través de una membrana semipermeable, hacia otra solución de mayor concentración, hasta alcanzar su equilibrio. La ósmosis inversa consiste, en consecuencia, en la inversión del citado proceso mediante la aplicación de una energía externa en forma de presión [30] . El agua de mar de entrada es bombeada hacia una cámara cerrada donde esta es presurizada contra la membrana. Ya que una porción del agua pasa a través de la membrana, el contenido en sal de la salmuera restante aumenta. Al mismo tiempo, una porción de esta salmuera es liberada sin pasar por la membrana [28].

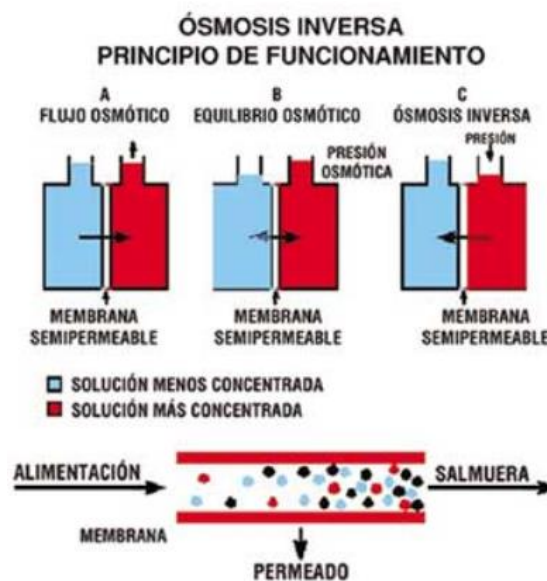


Fig. 5.8. Principio de funcionamiento de la ósmosis inversa [29]

Las membranas de ósmosis inversa están hechas según una gran variedad de configuraciones. Dos de las más exitosas son los módulos enrollados en espiral y los módulos de fibra hueca. El funcionamiento de los módulos RO en materias de rechazo de sal, flujo del producto permeado y la compactación de la membrana han sido mejorados durante los últimos años. Los modelos de DEEP comprenden el efecto que tienen la salinidad y temperatura del agua de entrada en la relación de recuperación y presión del agua de alimentación.

Un criterio clave para el diseño de plantas de ósmosis inversa es el consumo específico de electricidad, que debe de ser lo más pequeño posible. Esto significa que el ratio de recuperación debe mantenerse tan alto como sea posible y la presión de entrada tan baja como sea posible, cumpliendo siempre con los estándares mínimos para el agua potable. Debido a que los ratios de recuperación de la mayoría de las plantas RO son solo del 30 al 50%, y que la presión de la salmuera liberada es poco menor que la presión del agua de entrada, todas las plantas de ósmosis inversa están dotadas de turbinas de recuperación energética.

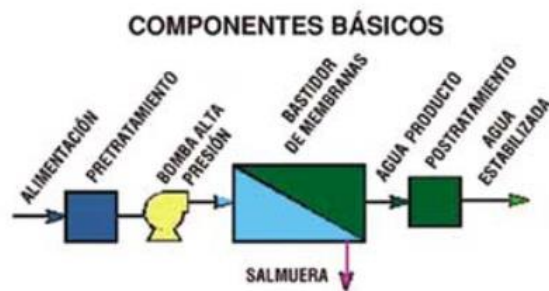


Fig. 5.9. Componentes básicos de un sistema RO [29].

5.4 Modelos técnicos para la desalinización

Los modelos técnicos manejados por el programan están basados en simples ciclos termodinámicos y expresiones empíricas con el objetivo de estimar los diferentes datos necesarios para los modelos económicos a partir de una serie de variables de entrada: la capacidad necesaria de la planta, salinidad y temperatura del agua de entrada [28].

El modelo de desalinización por destilación describe el funcionamiento de plantas MSF y MED en términos de consumo energético. Es usado para calcular la máxima producción de agua a partir de un intervalo de temperaturas determinado. Está basado en el cálculo empírico del GOR (gain output ratio) como una función del número de efectos [28].

Las plantas de desalinización por destilación operan en un rango de temperaturas específico que depende de la mínima temperatura del agua de entrada disponible y la máxima temperatura a la que puede llegar la salmuera. Suponiendo un mínimo intervalo de temperatura para cada efecto, tanto el número total de efectos como el GOR pueden ser calculados. La energía térmica y eléctrica necesarias pueden ser aproximadas para una capacidad determinada. Si se decide usar termocompresión de vapor, entonces será necesario introducir la relación de flujo de vapor entrante a flujo de vapor motriz. Las tecnologías MED y MSF solo difieren en el cálculo del GOR.

Por otro lado, el modelo de ósmosis inversa es usado para estimar la potencia necesaria para la desalinización de un determinado volumen de agua. Esta potencia depende del consumo de cada una de las bombas, las bombas de refuerzo y la potencia recuperada por los sistemas de recuperación de energía.

5.5 Modelos económicos para la desalinización.

Los costes usados por el programa para el cálculo del coste total de la producción de agua están resumidos en la Fig. 5.10. Por un lado, los costes de capital que hacen referencia a los costes de construcción son calculados como un total y luego son anualizados mediante el método comentado en el apartado 4.6. Por otro lado, los costes operacionales que incluyen tanto costes energéticos como costes operacionales y mantenimiento son calculados de manera anual. En el presente proyecto se hizo uso de todos los datos económicos aportados por el programa excepto los costes energéticos que fueron calculados de la siguiente manera.

En primer lugar, se modelaron las plantas desalinizadoras necesarias para cubrir la demanda de la isla. Estas plantas desalinizadoras contaban con 4 diseños diferentes dependiendo de la tecnología utilizada (MSF, MED, TVC, RO). Una vez modeladas la plantas, DEEP proporcionó los datos correspondientes a las necesidades energéticas de las mismas. Estos datos fueron usados para ampliar las capacidades de las plantas de energía renovable propuestas en estudios anteriores [18].

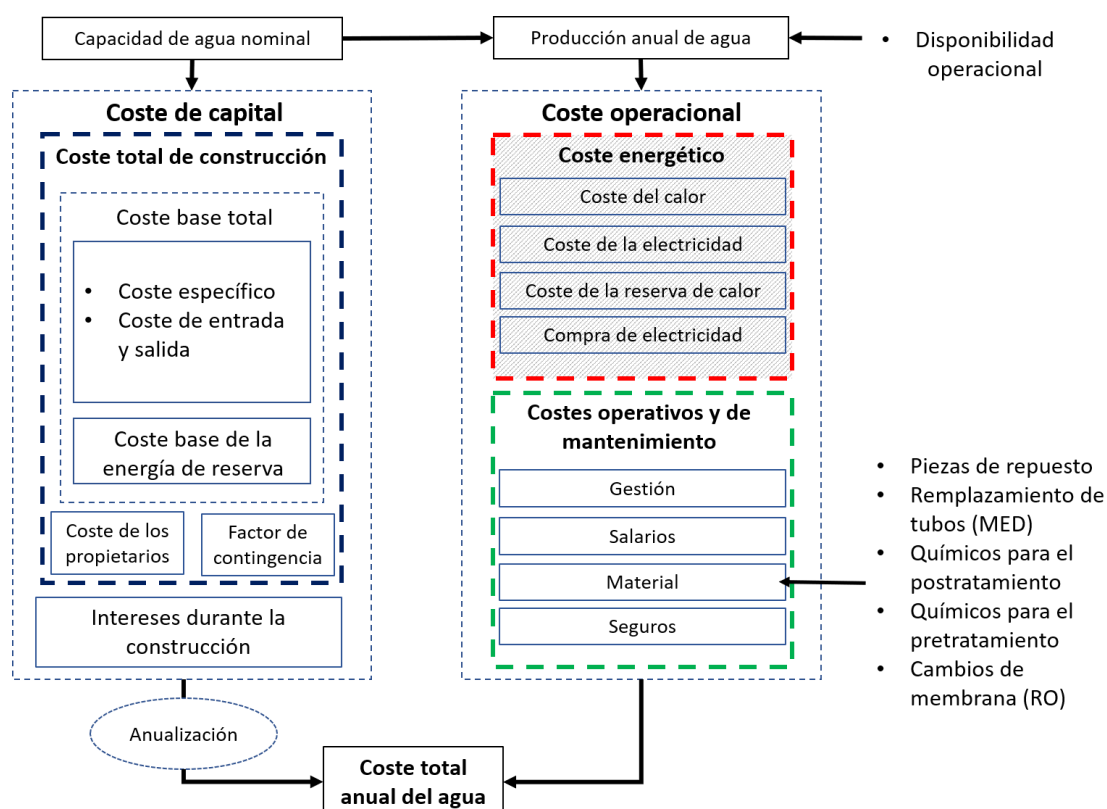


Fig. 5.10. Esquema de los costes evaluados por el programa.

Esta ampliación de las capacidades se decidió llevar a cabo ya que los sistemas propuestos estaban diseñados para satisfacer la demanda energética de Skyros en su totalidad. Estas plantas energéticas fueron testadas bajo extremas condiciones de demanda y condiciones climáticas. Por tanto, un uso de la energía de estas plantas originales supondría una situación muy arriesgada ya que las plantas no podrían satisfacer la demanda en un caso extremo.

Experimentalmente, se comprobó que dentro de las tres alternativas propuestas, el escenario 2 proporcionaba un coste de la electricidad menor tras la ampliación (ANEXO F). Este escenario 2 cuenta con una planta híbrida que combina energía fotovoltaica (PV) con energía eólica, apoyado con almacenamiento eléctrico y producción de hidrógeno (Fig. 5.11).

Haciendo uso de la hoja de cálculo con la que se computaron los costes de las plantas, se recalculó la tasa de recuperación (TRR) considerando la ampliación de la capacidad del sistema fotovoltaico (única parte del sistema que proporciona energía térmica directamente) y la ampliación del terreno para cada una de las tecnologías de desalinización disponibles. Una vez obtenido el nuevo precio de la electricidad, se estimó el coste de esta energía térmica como la diferencia del precio de un kilovatio hora tras la ampliación y el coste original.

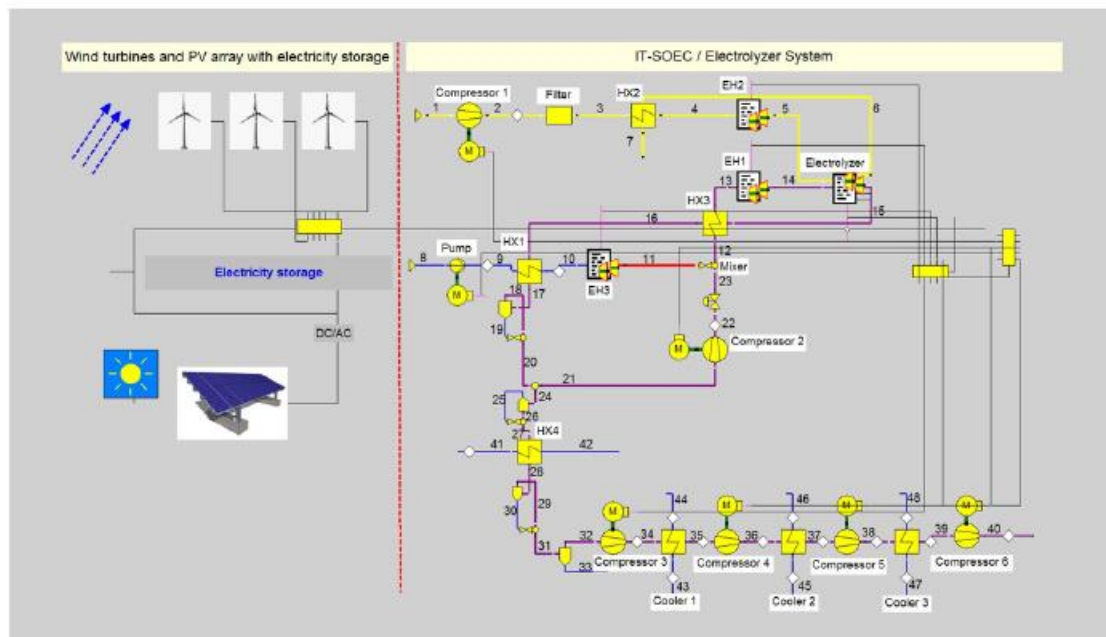


Fig. 5.11. Diagrama de flujo del escenario usado

6. TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

Como ya se comentó en el marco legal del proyecto, un 10% de la población griega (dentro de los cuales se encuentran los habitantes de Skyros) carece de estos sistemas de tratamiento de aguas residuales. La reutilización de agua es un método que actualmente no es usado en las islas del mar Egeo (excepto algunos hoteles aislados) y por tanto, representa una gran oportunidad de desarrollo ya anunciada por varios investigadores [32,4].

6.1 Aplicaciones de reutilización del agua.

Existen numerosas aplicaciones (Tabla IX) para las cuales se puede usar agua regenerada, cada sistema de tratamiento de agua residual debe de ser adaptado según el uso para el que esté destinada esta agua. Ya que la actividad industrial en las islas es muy baja (considerada nula en el presente proyecto), la mayoría del agua regenerada decidió usarse para aplicaciones agrarias. Uno de los motivos de la nula utilización de agua regenerada en las islas es la falta de legislación durante un periodo de tiempo tan extenso [16]. La última legislación vigente es la publicada por el Ministerio de Interior de la República Helénica de 2011 en la que se establecen los estándares de calidad para un uso agrícola (Tabla XI).

TABLA IX.
POSIBLES APLICACIONES DEL AGUA RESIDUAL EN LAS ISLAS DEL MAR EGEO [16]

| APLICACIÓN | OBSERVACIONES |
|---|--|
| RIEGO AGRÍCOLA | El agua reutilizada puede usarse para el cultivo de verduras y frutas, así como el riego de árboles como los olivos. |
| RIEGO DE PAISAJES | La necesidad de agua para el riego de los paisajes ha aumentado dramáticamente como resultado de la construcción de nuevas casas de verano y resorts. Este tipo de agua es ideal para cubrir la demanda del riego de paisajes. |
| APLICACIONES INDUSTRIALES | Agua de refrigeración para algunas industrias |
| USOS URBANOS | La protección contra incendios, cisternas, lavado de coches son ejemplos de usos urbanos. |
| APLICACIONES AMBIENTALES Y RECREATIVAS | |
| RECARGA DE ACUÍFEROS | |
| AUMENTO DEL AGUA SUPERFICIAL | |

En este proyecto se tomaron como ejemplo algunos proyectos llevados a cabo en Grecia. Como se aprecia en la tabla X, los principales proyectos realizados usan el agua regenerada para cubrir la demanda de riego y, por tanto, el proyecto de Skyros siguió este ejemplo.

La agricultura en las islas del mar Egeo ha disminuido significativamente en los últimos años porque la mayoría de la población puede ganar más dinero trabajando en el turismo [16]. La escasez de agua es otra de las razones por las que esta actividad ha bajado notablemente ya que el agua recolectada es directamente dirigida a las ciudades para consumo urbano. Las altas temperaturas de esta zona, en comparación con otros lugares europeos, representan una gran oportunidad para la producción de cultivos fuera de temporada, los cuales tienen altos precios en el mercado. Además, la agricultura se puede beneficiar del nitrógeno y fósforo presente en el agua regenerada.

TABLA X.
PRINCIPALES PROYECTOS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN GRECIA [5]

| Proyecto | Región | Capacidad (m ³ /día) | Cultivos |
|----------------|-------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| Thessaloniki | Macedonia central | 165,000 | Maíz, remolacha azucarera, arroz |
| Iraklion | Creta | 9,500 | Viñas y olivos |
| Levadia | Grecia central | 3,500 | Algodón y maíz |
| Amfissa | Grecia central | 400 | Olivos |
| Nea kalikratia | Macedonia central | 800 | Olivos |
| Chersonissos | Creta | 4,500 | Olivos |
| Malia | Creta | 2,500 | |
| Archanes | Creta | 550 | Viñas y olivos |
| Kos | Egeo norte | 3,500 | Olivos, cítricos |

Las regulaciones griegas actuales distinguen entre las siguientes aplicaciones [3]:

- Usos urbanos incluyendo el riego de paisajes, usos recreativos, lavado de coches y protección contra incendios.
- Riego de cultivos y viveros comerciales con o sin restricciones.

- Usos industriales como refrigeración, alimentación de calderas, etc.
- Recarga de acuíferos no usados con fines de agua potable.

A su vez estas regulaciones distinguen tres calidades diferentes en función de criterios microbiológicos. Para el caso de regadío sin restricciones (uso final del agua residual en la isla), se requiere un tratamiento biológico secundario seguido de un tratamiento más alto y desinfección para llegar a los parámetros mínimos de calidad presentes en la Tabla XI.

TABLA XI.
PARÁMETROS MICROBIOLOGICOS Y QUÍMICOS MÍNIMOS PARA USO AGRÍCOLA [33]

| <i>Categoría</i> | <i>TC (cfu/100mL)</i> | <i>BOD₅ (mg/L)</i> | <i>TSS (mg/L)</i> | <i>Turbiedad (NTU)</i> |
|---------------------------------------|--|-------------------------------|---------------------------|------------------------|
| <i>Uso agrícola sin restricciones</i> | ≤2 en 80% de las muestras y ≤20 en 95% de las muestras | ≤10 en 80% de las muestras | ≤2 en 80% de las muestras | ≤2 |

6.2 Requisitos infraestructurales para la reutilización de agua.

Los requisitos infraestructurales para la reutilización de agua en las islas del mar Egeo incluyen recogida del agua residual, tratamiento, almacenamiento y distribución [16]. Para el caso de Skyros donde los orígenes de estas aguas residuales son comunidades y pequeñas ciudades, se estableció que las siguientes infraestructuras eran necesarias; sistema de recogida ya sea por gravedad, presión o vacío, instalaciones de tratamiento, instalaciones avanzadas para la regeneración de agua, almacenamiento y sistemas de distribución.

6.2.1 Recolección de aguas residuales.

Actualmente, en las islas del mar Egeo existen sistemas de recogida de aguas residuales que consisten básicamente en alcantarillados por gravedad [16]. Estos sistemas antiguos son bastante problemáticos ya que se producen infiltraciones y exfiltraciones, debidas mayormente a malas construcciones y problemáticas con las conexiones. Las exfiltraciones resultan en la contaminación de acuíferos locales y las infiltraciones suelen ser un severo problema si los sistemas de recogida están colocados en las cercanías del mar.

Con el objetivo de solucionar estos problemas existentes en el sistema de recogida actual, se optó por el cambio a un sistema de recolección por vacío (Figura 6.1). Dentro de las alternativas disponibles, el funcionamiento de este sistema se ajustaba más con la topografía de la isla ya que su topografía ideal es plana y la isla cuenta con un terreno suave en la mayoría de su superficie [6, 34].

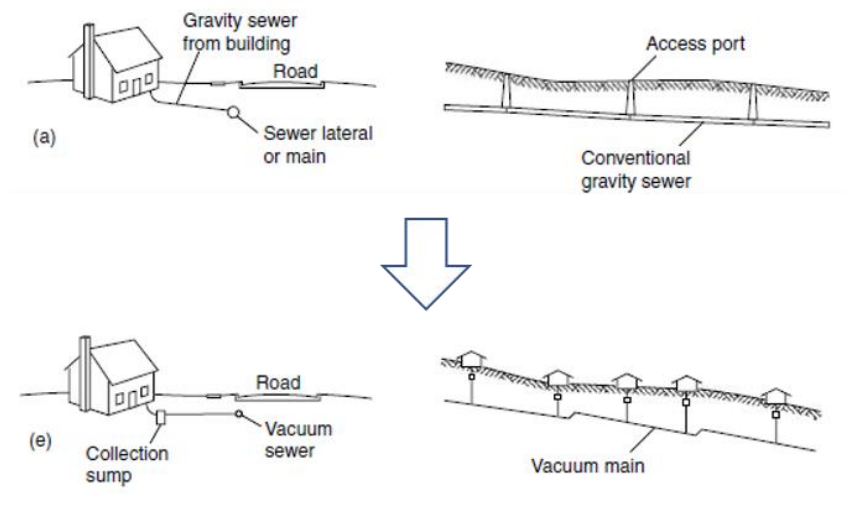


Fig. 6.1. Sistemas de recolección; a) alcantarillado por gravedad, e) sistema de recolección por vacío [34].

6.2.2 Tratamiento.

Debido a la importancia de la calidad del agua de salida en el tratamiento de aguas residuales, diferentes tecnologías son utilizadas, tanto individualmente o de manera combinada para alcanzar los niveles deseados. En la Fig. 6.2 se muestran los diferentes niveles y tecnologías de tratamiento disponibles y señalados en amarillo los métodos que se decidió utilizar según las indicaciones existentes [34].

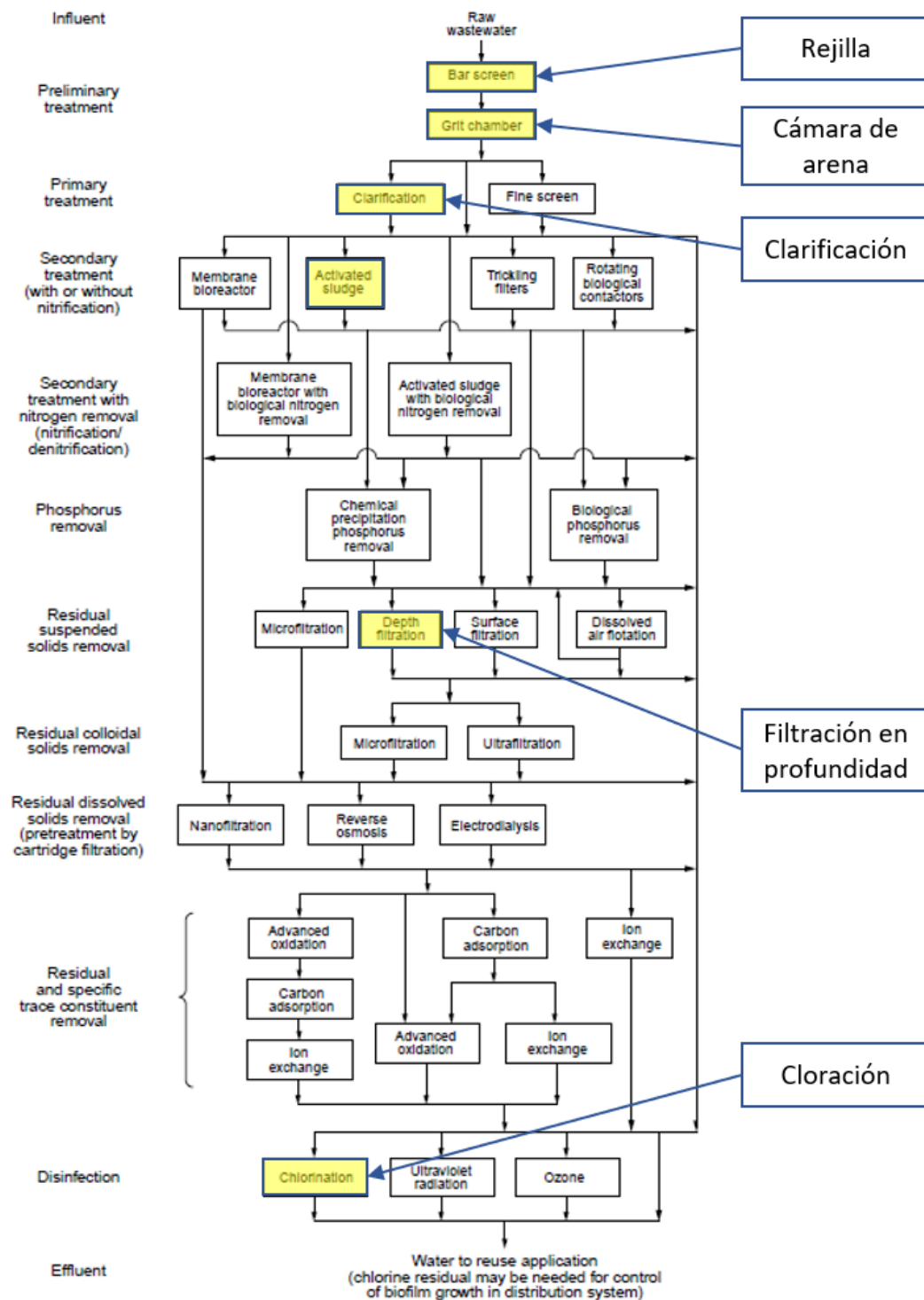


Fig. 6.2. Tecnologías para el tratamiento de aguas residuales [34].

6.3 Caudal disponible.

El agua disponible para tratar proviene del consumo urbano, el cual representa un 35% de la demanda total. Además, la cantidad de agua residual producida varía de un país a otro o incluso entre comunidades del mismo país, donde esto depende del estilo de vida, clima y usos del agua. En áreas residenciales, el agua residual representa aproximadamente el 75% del agua potable total consumida. Por tanto, en este proyecto se consideró que el agua residual disponible para ser tratada representaba un 26% de la demanda total diaria.

6.4 Análisis económico.

Para el análisis económico de la reutilización de aguas residuales se hizo uso de la información que aparece en la tabla XII, donde se exponen los costes por unidad de volumen. Al igual que en muchos procesos industriales, el coste por unidad de volumen es una función negativa del tamaño del proceso. Por ello, los datos están divididos en 3 rangos diferentes, dependiendo de la capacidad de agua a tratar. Se consideraron plantas con capacidades entre 100 y 1,000 m³/día, 1,000-2,500 m³/día y 2,500-5,000 m³/día. Se presentan dos rangos de costes, el primer rango de costes solo considera el tratamiento mientras que el segundo representa los costes incurridos por tratamiento, bombeo, distribución y almacenamiento. Los costes representados en la tabla tienen en cuenta las siguientes suposiciones:

- Los costes de capital, operación y mantenimiento para el tratamiento de aguas residuales están ajustados para mitades del 2007, asumiendo un aumento lineal del coste con una tasa de inflación del 5 %.
- Los costes de capital fueron depreciados usando una vida útil de 15 años con una tasa de descuento del 5 %.
- Se asumió que 3 días de almacenamiento eran necesarios para los picos máximos de flujo en verano. Sin embargo, este almacenamiento no es necesario en la isla ya que este cambio abrupto entre flujos en verano e invierno no existe.
- La longitud del sistema de distribución y el bombeo varía según la capacidad de la planta, por tanto, las siguientes longitudes y alturas manométricas fueron consideradas:
 - 100-1,000 m³/día: longitud = 2km, altura manométrica = 50m.

- 1,00-2,500 m³/día: longitud = 5km, altura manométrica = 100m.
- 2,500-5,000 m³/día: longitud = 10km, altura manométrica = 200m.
- Los costes de capital para los sistemas de distribución fueron depreciados usando una vida útil de 20 años y una tasa de descuento de 5 %.
- El efluente de la planta de tratamiento se consideró que no tenía valor comercial.
- El coste de la electricidad es de 0.15€/kWh.
- Coste del almacenamiento de aguas residuales: 500€/m³.
- Coste de las tuberías de distribución en función del diámetro:
 - 0.064m: 55€/m.
 - 0.1m: 60€/m.
 - 0.15m: 65€/m.
 - 0.25m: 70€/m.
- El coste de mano de obra para el mantenimiento de los sistemas de distribución es: 20€/h.

TABLA XII.
COSTES UNITARIOS POR METRO CÚBICO [16].

| <i>Capacidad volumétrica (m³/día)</i> | <i>Coste (€/m³)</i> |
|--|--------------------------------|
| 100-1,000 | 0.25-0.35 |
| | 0.75-1.35 |
| 1,000-2,500 | 0.15-0.20 |
| | 0.60-0.75 |
| 2,500-5,000 | 0.15-0.18 |
| | 0.65-0.75 |

De los costes presentados en la tabla anterior se tomó el primer rango de valores. Para el caso de Skyros, como ya hemos comentado anteriormente, los costes incurridos por almacenamiento no son necesarios y, además debido a la proximidad de la planta con el lugar de consumo del agua tratada, los costes de distribución se consideraron nulos. En la tabla XIII se presentan las cantidades de energía necesarias segmentadas en los mismos rangos de capacidades. Estos volúmenes energéticos, multiplicados por el precio energético asumido en la referencia, fueron restados del coste total por unidad de

volumen. La operación anterior se realizó con el objetivo de remplazar los costes energéticos asumidos en un primer momento por los costes energéticos al precio real de la electricidad en la isla tras la ampliación de las plantas eléctricas.

TABLA XIII.
REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS POR UNIDAD DE VOLUMEN [16].

| <i>Capacidad volumétrica (m³/día)</i> | <i>Requerimientos energéticos (€/m³)</i> |
|--|---|
| <i>100-1,000</i> | 0.08-0.115 |
| <i>1,000-2,500</i> | 0.08-0.12 |
| <i>2,500-5,000</i> | 0.05-0.1 |

7. IMPORTACIÓN DE AGUA EN BARCO

Para el caso de importación de agua en la isla, los costes por unidad de volumen tomados provienen de la misma fuente de información que el capítulo anterior [16]. En este caso, se hizo uso de dos únicas suposiciones; los costes se basaron en el transporte del agua a lo largo de una distancia de 100km y el precio del Diesel usado en los tanques se consideró 0.65€/L. La distribución de los costes también se encuentra segregada en 3 rangos de capacidades diferentes como se puede apreciar en la Tabla XIV.

TABLA XIV.
COSTE POR UNIDAD DE VOLUMEN PARA EL TRASPORTE DE AGUA [16].

| <i>Capacidad volumétrica (m³/día)</i> | <i>Coste (€/m³)</i> |
|--|--------------------------------|
| 100-1,000 | 5-7 |
| 1,000-2,500 | 5-6 |
| 2,500-5,000 | 4-6 |

La capacidad del tanque tiene un impacto muy significativo en el consumo energético por metro cúbico de agua. Este coste energético representa un 45 % del total para este tipo de suministro de agua. Por ello, el coste por unidad de volumen es una función negativa de la capacidad al aumentar la demanda de energía cuanto más pequeños son los barcos de transporte. Por ejemplo, para el transporte de agua dulce a la isla de Spetse, desde la costa del Peloponense (unos 30km de distancia) se usan dos tanques. Uno con una capacidad de 1,100 m³, y otro con 2,100 m³. El primer barco consume aproximadamente 500L de Diesel, mientras que el último consume 650L de Diesel por viaje, a pesar de que el segundo barco transporta casi el doble de volumen de agua [16].

Con el objetivo de comparar el sistema propuesto con uno de los métodos usados en la actualidad en la isla, como es este transporte marítimo de agua, se estimaron los costes anuales que este método supone multiplicando el caudal anual necesario en la isla por el precio por unidad de volumen presentado en la tabla XIV.

8. RESULTADOS

Con el objetivo de poder extrapolar este estudio a otras islas con características similares se presentaron dos alternativas diferentes. La primera hace uso de la fuente natural presente en la isla mientras que en la segunda toda el agua usada es de nueva generación. Estas dos alternativas a su vez están divididas en 4 soluciones, una para cada una de las zonas hídricas de la isla. Como ya se comentó anteriormente, cada una de las soluciones cuenta con sistemas de desalinización y sistemas de tratamiento de aguas residuales. Este último resulta ser el mismo para ambas alternativas ya que el uso de los embalses solo afecta al suministro de agua apta para el consumo humano. Las zonas 1 y 2 cuentan con sistemas de suministro semejantes, mientras que las zonas 3 y 4 al ser ciudades aisladas cuentan con sistemas de suministro bastante más simples.

8.1 Alternativa I.

En esta primera alternativa los embalses son el núcleo central del sistema. En ellos se almacena el agua dulce preparada para ser servida y consumida en cada uno de los puntos de la isla. Estos embalses son alimentados de agua proveniente de las plantas desalinizadoras instaladas, así como de la fuente existente en la isla. El agua proveniente de Anavalsa es almacenada en Ferekampos y debida a su óptima calidad es utilizada para el consumo humano tras un pequeño tratamiento previo al ser bombeada desde el embalse principal.

8.1.1 Zonas 1-2.

8.1.1.1 Suministro de agua apta para el consumo humano.

Como primer sistema de suministro de agua apta para el consumo se propuso la red de transporte de la Fig. 8.1, que contaba con una conexión entre las zonas 1 y 2 que proporcionaba una mayor seguridad a ambas zonas en caso de fallo. Los embalses establecidos en el modelo son Ferekampos (ya existente) y un Embalse 2 situado en la zona dos ya que se consideró necesario para asegurar la viabilidad del sistema total.



Fig. 8.1. Sistema desestimado.

Tras analizar la viabilidad de esta interconexión de las zonas 1 y 2 mediante la conexión Acherounes- Kalikri, se desestimó la opción por su larga distancia (2745km) quedando las zonas 1 y 2 aisladas. Desaparece también la conexión Aspous-Skyros para simplificar el sistema. Finalmente, el sistema de conexiones de las zonas 1 y 2 quedó representado por la Fig. 8.2. El agua siempre proviene de los embalses y es conducida hasta las diferentes ciudades. Estas tuberías son de un único sentido y contarán con sistemas de almacenamiento para el agua no consumida en cada ciudad con el objetivo de sanear posibles fallos del sistema.

Los costes obtenidos para el transporte de agua potable quedan resumidos en la tabla XV y el resto de los cálculos correspondientes a cada conexión se pueden encontrar en el Anexo B.

TABLA XV.
COSTES SISTEMA DE TRANSPORTE DE AGUA POTABLE

| | Inversión tuberías (miles de €) | Inversión bombas (miles de €) | Coste operacional (miles de €/año) | Coste total anual (miles de €/año) |
|---------------|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Zona 1 | 10,648 | 8 | 6 | 2,681 |
| Zona 2 | 1,107 | 5 | 3 | 95 |



Fig. 8.2. Sistema de conexiones Alternativa 1.

8.1.1.2 Sistema de recogida de aguas residuales.

El sistema de recogida de aguas residuales consiste en una línea de recogida que comienza en las ciudades más lejanas a la planta de tratamiento, donde finaliza el sistema. Este sistema representado en la Fig. 8.3, al igual que el sistema anterior cuenta con tuberías unidireccionales. Los costes de este sistema quedan representados en la tabla XVI y el resto de los cálculos correspondientes a cada conexión se pueden encontrar en el Anexo C.

TABLA XVI.
SISTEMA DE RECOGIDA DE AGUAS RESIDUALES

| | Inversión tuberías (miles de €) | Inversión bombas (miles de €) | Coste operacional (miles de €/año) | Coste total anual (miles de €/año) |
|---------------|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Zona 1 | 1,940 | 52 | 59 | 223 |
| Zona 2 | 1,236 | 37 | 37 | 129 |



Fig. 8.3. Sistema de recogida de aguas residuales.

8.1.1.3 Sistema de alimentación desalinizadoras-embalses.

Se propusieron dos alternativas diferentes, la primera se basa en el uso de una sola planta desalinizadora para alimentar ambos embalses y la segunda proponía una planta desalinizadora para cada zona. Tras analizar ambas alternativas se decidió construir dos plantas desalinizadoras ya que los costes totales eran bastante similares y esta segunda opción aporta una mayor independencia para el sistema. Por tanto, el posicionamiento de las plantas de desalinización y tuberías de conexión se puede ver en la Fig. 8.4. Los costes de este sistema de tuberías obtenidos quedan reflejados en la tabla XVII y el resto de los cálculos correspondientes a cada conexión se pueden encontrar en el Anexo D.

TABLA XVII.
SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DESALINIZADORAS-EMBALSES

| | Inversión tuberías (miles de €) | Inversión bombas (miles de €) | Coste operacional (miles de €/año) | Coste total anual (miles de €/año) |
|-----------------------|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| DP1-Ferekampos | 823 | 55 | 102 | 153 |
| DP2-Embalse 2 | 227 | 41 | 53 | 79 |



Fig. 8.4. Sistema de alimentación desalinizadoras-embales.

8.1.1.4 Coste producción de agua en desalinizadoras.

Como se explicó anteriormente, se decidió instalar una planta desalinizadora en cada una de las zonas uno y dos. Tras analizar que combinación de procesos era la más viable (ANEXO F) económicamente se optó por instalar una planta de ósmosis inversa (RO) en la zona uno, y una planta de destilación multiefecto (MED) en la zona dos. El esquema de estas plantas está representado por la figura 8.5. Tras la ampliación de la planta fotovoltaica se obtuvieron los siguientes costes anuales presentados en la tabla XVIII.

TABLA XVIII
COSTES ANUALES DE LA DESALINIZACIÓN DE AGUA

| | Costes fijos (millones de €) | Coste de mantenimiento (miles de €/año) | Coste energético (miles de €/año) | Coste total anual (miles de €/año) |
|-----|---------------------------------|--|--------------------------------------|---------------------------------------|
| DP1 | 3 | 350 | 1,019 | 1,649 |
| DP2 | 1 | 190 | 29 | 313 |

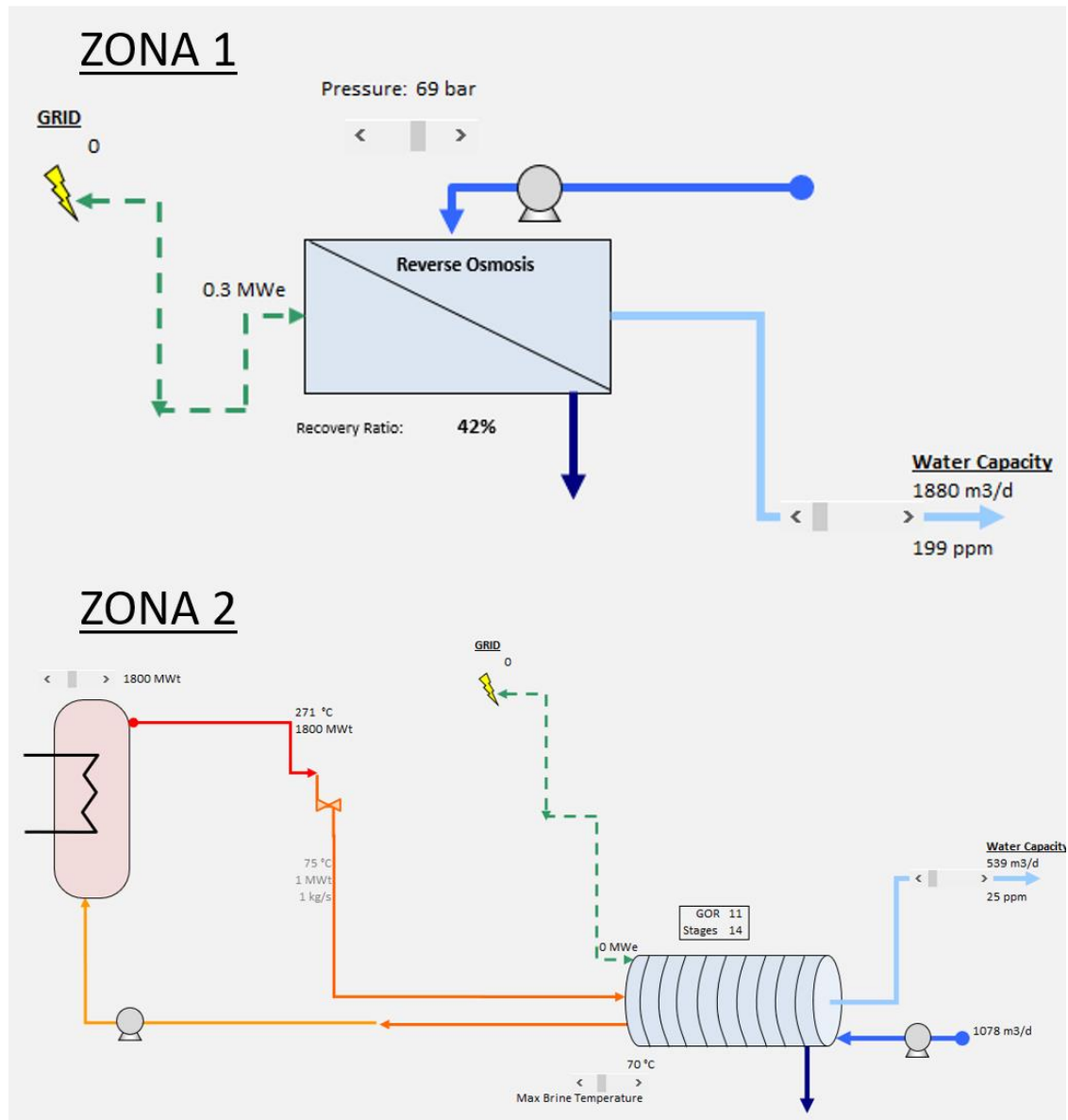


Fig. 8.5. Esquema de las plantas desalinizadoras de las zonas 1 y 2 (alternativa 1).

8.1.1.5 Coste tratamiento de aguas residuales.

El agua urbana tras ser consumida por los usuarios es tomada por los sistemas de recogida ya comentados en apartados anteriores y conducida hasta las plantas de tratamiento. Se decidió instalar una planta de tratamiento de aguas residuales diferente para cada una de las zonas una y dos. Los costes de este tratamiento quedan representados por la tabla XIX.

TABLA XIX.
COSTES ANUALES DEL TRATAMIENTO DE AGUAS

| | Costes energéticos (€/día) | Coste total (€/día) | Coste total anual (miles de €/año) |
|--------------|-------------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| WWTP1 | 181 | 951 | 347 |
| WWTP2 | 27 | 225 | 82 |

8.1.2 Zonas 3-4.

Como primera alternativa se planteó transportar agua procedente de las zonas 1 y 2 para cubrir la demanda de las zonas 3 y 4. Tras un breve análisis, se descubrió la inviabilidad de esta alternativa debido a las grandes distancias y el pequeño caudal a transportar. En la zona 3 se decidió instalar una planta de desalinización propia con tecnología de ósmosis inversa (RO) debido a la larga distancia que la separa del parque solar instalado y que por tanto imposibilita el uso de energía térmica. El coste para esta planta es de 747.27 miles de euros al año incluyendo gastos operacionales y de mantenimiento. En el caso de la zona 4, debido a su tamaño poblacional (13 habitantes) no es viable la construcción de una planta de gran escala y por tanto se recurrió a alternativas más sencillas. Estas alternativas se presentan ordenadas en el gráfico de la Fig.8.6, según su estado de desarrollo y capacidad típica de tratamiento. Se optó entonces por dos opciones diferentes; humidificación solar multiefecto y ósmosis inversa con solar fotovoltaica. Mientras que la producción por unidad de volumen de la opción uno es de 3.5 €/m³, la opción dos tiene un precio de producción de 10 €/m³ por lo que se decidió hacer uso de esta primera. Por tanto, los costes anuales de la producción de agua para la zona cuatro son de 61 mil euros.

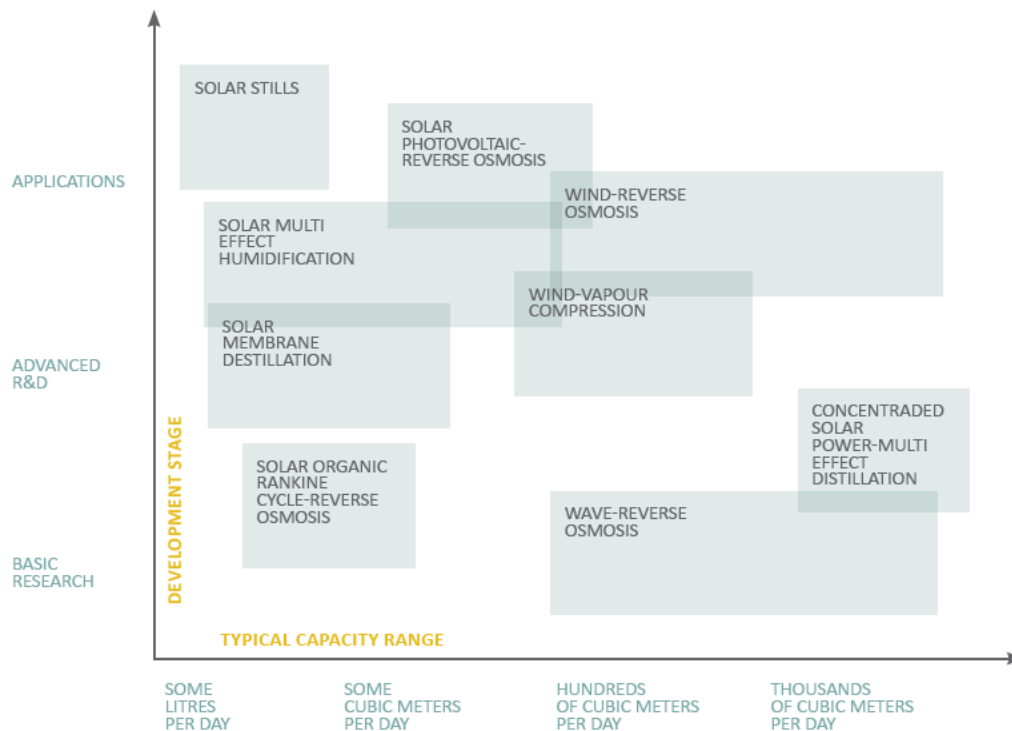


Fig. 8.6. Gráfico de tecnologías de desalinización renovables [35].

8.2 Alternativa II.

En este caso las desalinizadoras son el núcleo central del sistema ya que aportan agua potable directamente a las ciudades. Esta alternativa es perfectamente extrapolable a cualquier isla de las mismas características. Se propone entonces, un nuevo sistema de distribución de agua potable, pero tanto el sistema de tratamiento de aguas residuales como las soluciones para las zonas tres y cuatro son las mismas que las mostradas en la alternativa uno.

8.2.1 Zonas 1-2.

8.2.1.1 Suministro de agua apta para el consumo humano.

El sistema propuesto para el transporte del agua producida por las plantas desalinizadoras es el representado en la Fig. 8.7. El agua siempre proviene de las desalinizadoras y es conducida hasta las diferentes ciudades. Estas tuberías son de un único sentido y cuentan con sistemas de almacenamiento para el agua no consumida en cada ciudad con el

objetivo de sanear posibles fallos del sistema. Los costes de este sistema de tuberías obtenidos quedan reflejados en la tabla XX y el resto de los cálculos correspondientes a cada conexión se pueden encontrar en el Anexo E.



Fig. 8.7. Sistema de conexiones alternativa 2.

TABLA XX.
COSTES SISTEMA DE TRANSPORTE DE AGUA POTABLE

| | Inversión tuberías (miles de €) | Inversión bombas (miles de €) | Coste operacional (miles de €/año) | Coste total anual (miles de €/año) |
|--------|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Zona 1 | 7,978 | 835 | 2,247 | 3,070 |
| Zona 2 | 1,727 | 314 | 693 | 883 |

8.2.1.2 Coste producción de agua en desalinizadoras.

Como se explicó anteriormente, se decidió instalar una planta desalinizadora en cada una de las zonas uno y dos. Tras analizar que combinación de procesos era la más viable (ANEXO F) económicamente se optó por instalar una planta de ósmosis inversa (RO) en la zona uno, y una planta de destilación multiefecto (MED) en la zona dos. El esquema de estas plantas está representado por la figura 8.8. Tras la ampliación de la planta fotovoltaica se obtuvieron los siguientes costes anuales presentados en la tabla XXI.

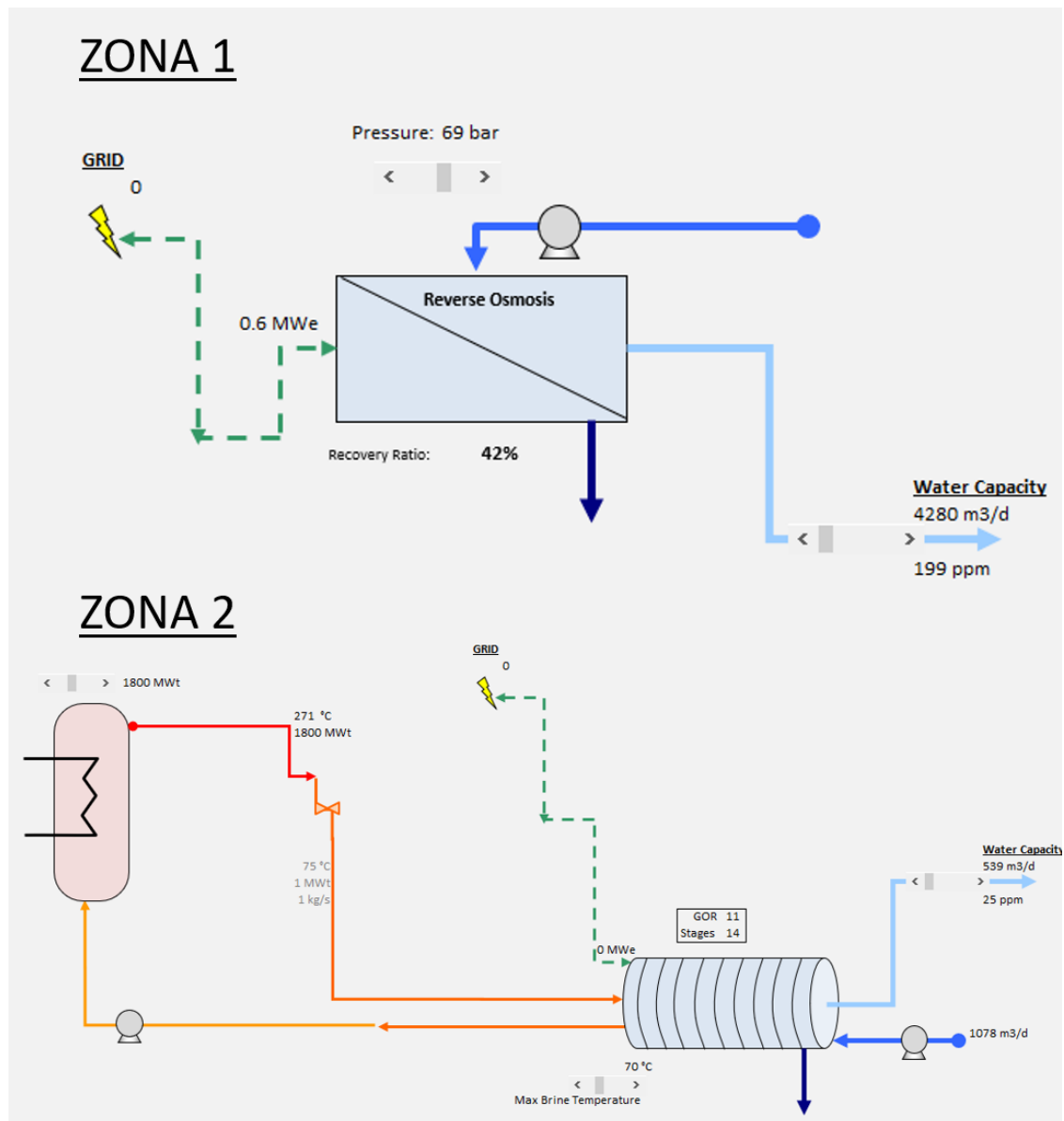


Fig. 8.8. Esquema de las plantas desalinizadoras de las zonas 1 y 2 (alternativa 2).

TABLA XXI.
COSTES ANUALES DE LA DESALINIZACIÓN DE AGUA

| | Costes fijos (millones de €) | Coste de mantenimiento (miles de €/año) | Coste energético (miles de €/año) | Coste total anual (miles de €/año) |
|-----|---------------------------------|--|--------------------------------------|---------------------------------------|
| DP1 | 6 | 610 | 2,038 | 3,208 |
| DP2 | 1 | 190 | 29 | 313 |

8.3 Análisis de los resultados.

Los resultados obtenidos para ambas alternativas son bastante parecidos, 9.2 millones de euros al año para la primera y 9.8 millones de euros para la segunda (presupuestos completos en ANEXO G). Esta mínima diferencia se debe a la utilización de la fuente natural de Anavalsa en el primer caso. Los costes llevan implícitos las anualidades de los costes fijos y los costes operacionales de bombas, plantas desalinizadoras y otros costes relevantes durante los 20 años del supuesto periodo de diseño del sistema. Por tanto, estas cantidades que en un primer momento pueden parecer desmesuradas, son incurridas solamente durante el periodo de diseño, pasados estos años los costes se reducirán a operacionales y de mantenimiento.

Como se puede apreciar en las figuras 8.9 y 8.10 alrededor del 50% de los gastos corresponde al transporte y recogida del agua, ya sea potable o residual. Con este razonamiento podríamos decir que la mitad del coste del metro cúbico de agua se debe a la logística necesaria por el pequeño tamaño de las poblaciones y las largas distancias que las separan. Este proyecto se desarrolló teniendo en cuenta las tecnologías de transporte presentes en la actualidad, queda entonces mucho camino por recorrer en lo que respecta a las tecnologías de transporte de agua. Por otro lado, la otra mitad del coste corresponde a la producción de agua desalinizada con costes de 2.05, 1.59, 5.63 y 3.5 €/m³ para las zonas 1,2,3 y 4 respectivamente. Esto deja entrever una necesidad de mejora sobre todo en plantas de pequeño caudal y plantas más aisladas. Por otro lado, los avances ocurridos en el tratamiento de aguas residuales se pueden apreciar en los costes de esta tecnología, 0.2 y 0.4 €/m³ que representa, entonces, una parte imprescindible para futuros sistemas de gestión de agua.

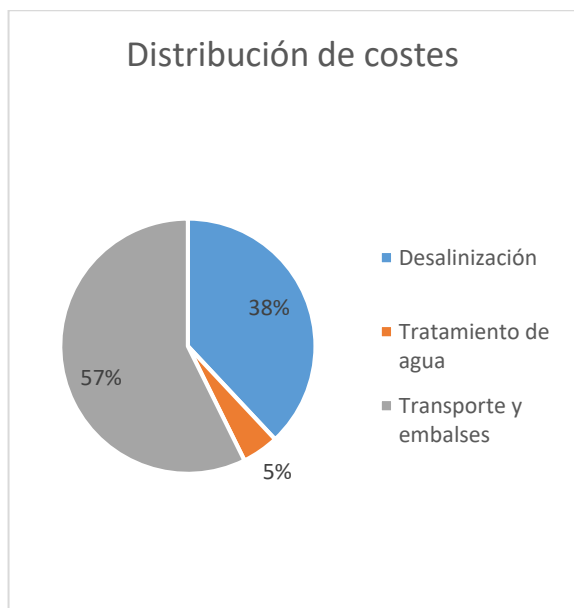


Fig. 8.9. Distribución de costes alternativa 1.

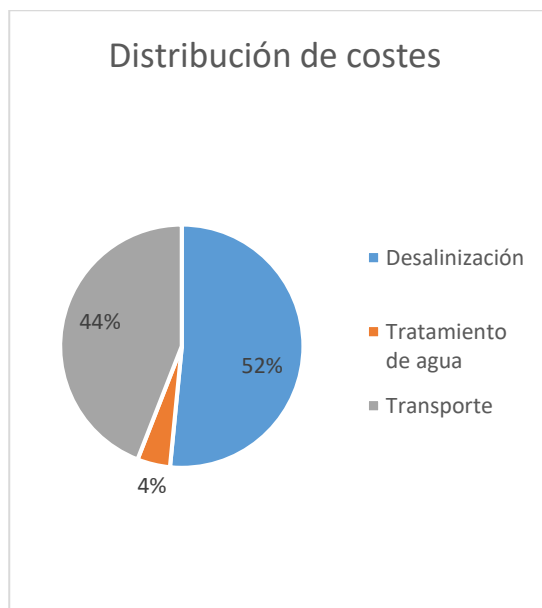


Fig. 8.10. Distribución de costes alternativa 2.

Para relacionar estos volúmenes monetarios anuales con la demanda anual de la isla y obtener una idea más clara de lo que estos costes representan, se calculó el precio del agua por unidad de volumen, obteniendo unos valores de 2.34 €/m^3 para la primera alternativa y de 2.49 €/m^3 para la segunda. Estos precios son comparables con precios de unos 3.5 €/m^3 ya estimados en proyectos previos basados en islas griegas usando fuentes renovables para los procesos de desalinización [9].

8.4 Comparación con la situación actual.

Actualmente, la isla usa el agua procedente de Anavalsa (la única fuente natural en la isla). Sin embargo, ya que la calidad del agua es inadecuada, grandes volúmenes de agua son importados desde el continente. Debido a la ausencia de información específica sobre la cantidad de agua importada en Skyros, se hizo uso de la información disponible para otra isla similar llamada Symi de unos 2,590 habitantes. Alrededor de $120,000 \text{ m}^3$ son transportados en barco hasta la isla cada año, a un coste que a veces supera los 7 €/m^3 [9]. Este problema será agravado con el crecimiento poblacional ya que la importación de agua es la única solución disponible en las islas para cubrir futuras demandas que excederán la capacidad de las fuentes naturales existentes. Además, el turismo podría

agravar esta situación de escasez de agua. Hoy, Skyros no tiene problemas de exceso de turismo, pero al igual que las demás islas es propensa a desarrollar desmesuradamente esta actividad en los próximos años. Adicionalmente, ya que el transporte de agua lleva implícito el consumo de combustibles fósiles, esta práctica tiene un impacto considerable en el problema de la huella de carbono y el cambio climático. Por tanto, comparando los costes dados por las alternativas mostradas en el proyecto con las soluciones a corto plazo (como la importación de agua) las cuales son usadas actualmente en muchas pequeñas islas del mediterráneo, podemos afirmar que las autoridades locales podrían beneficiarse de la construcción de estas soluciones sostenibles.

9. CONCLUSIONES

La demanda de agua en las islas del Mediterráneo ha ido aumentando constantemente durante la última década, como resultado del crecimiento de la población, las nuevas casas de vacaciones y el aumento del nivel de vida que juntos acabarán por desestabilizar las antiguas formas de producción de agua. Los grandes proyectos de construcción infraestructurales se evitan normalmente en las islas debido a la alta inversión requerida. Sin embargo, con un coste de agua de 2.49 €/m³, calculado en este trabajo, se puede concluir que estos nuevos proyectos sostenibles ya son factibles a pesar de las muchas mejoras necesarias, especialmente en la desalinización y el transporte de agua. Este tipo de proyectos convierten las islas en lugares autosuficientes al ofrecer una solución a largo plazo para este prominente problema.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Directiva Europea, “Consejo 98/83/EC,” pp. 1–66, 2008.
- [2] R. Energy, “Legislative and Institutional Issues for Energy & Water Greece, Italy, Spain, Portugal September 2010,” no. September, 2010.
- [3] Hellenic Ministry for the Enviroment, “Medidas y condiciones para el tratamiento de las aguas residuales urbanas,” 2011.
- [4] K. P. Tsagarakis, G. E. Dialynas, and A. N. Angelakis, “Water resources management in Crete (Greece) including water recycling and reuse and proposed quality criteria,” *Agric. Water Manag.*, vol. 66, no. 1, pp. 35–47, 2004.
- [5] A. Ilias, A. Panoras, and A. Angelakis, “Wastewater recycling in Greece: The case of Thessaloniki,” *Sustain.*, vol. 6, no. 5, pp. 2876–2892, 2014.
- [6] F. Petrakopoulou, “GENERGIS - Green Energy for Islands. Demographics, Geography, Economy and Energy Statistics of Skyros,” no. June 2015, 2012.
- [7] Hellenic National Meteorological Service - HNMS, “Climatology - Skyros 2018.” [Online]. Available: http://www.hnms.gr/emv/en/climatology/climatology_city?perifereia=Stereia&poli=Skyros.
- [8] Hellenic National Meteorological Service - ELSTAT, “Censo población Skyros 2011.”
- [9] J. K. Kaldellis and E. M. Kondili, “The water shortage problem in the Aegean archipelago islands: cost-effective desalination prospects,” *Desalination*, vol. 216, no. 1–3, pp. 123–138, 2007.
- [10] N. Kitsantonis, “Greece struggles with water shortage,” 2007.
- [11] C. A. Karavitis, P. Kerkides, M. Iwra, and F. Collins, “Estimation of the Water Resources Potential in the Island System of the Aegean Archipelago , Greece Estimation of the Water Resources Potential in the Island System of the Aegean Archipelago , Greece,” *Water*, no. August 2011, pp. 37–41, 2009.
- [12] M. L. Davis, *Water and wastewater engineering: Design principles and practice*. 2011.
- [13] P. K. Swamee and A. K. Sharma, *Design of Water Supply Pipe Networks*, no. 1. 2008.
- [14] ZURIAHATI, “Population forecasting,” 1987.
- [15] H. A. Bakir, “Sustainable wastewater management for small communities in the Middle East and North Africa,” *J. Environ. Manage.*, vol. 61, no. 4, pp. 319–328, 2001.
- [16] P. Gikas and G. Tchobanoglous, “Sustainable use of water in the Aegean Islands,” *J. Environ. Manage.*, vol. 90, no. 8, pp. 2601–2611, 2009.
- [17] N. Ghaffour and I. M. Mujtaba, “Desalination using renewable energy,” *Desalination*, vol. 435, no. February, pp. 1–2, 2018.
- [18] F. Petrakopoulou and M. Loizidou, “Scenarios for the Sustainable Development of

Energy Autonomy of Skyros,” 2012.

- [19] “California Water Code.” [Online]. Available: <https://law.justia.com/codes/california/2016/code-wat/division-7/chapter-2/section-13050/>.
- [20] W. R. Goals, “City of San Diego Water Reuse Study 2005,” 2005.
- [21] R. D. Rajesh, B. Chadrajit, and K. Arvind, “Removal of cyanide from water and wastewater using granular activated carbon.pdf.” .
- [22] S. Hazra, S. Ambatipati, K. Alton, and R. Sapienza, “Removal of Chloride from Water.” .
- [23] N. Trifunovic, “Water transmission,” p. 24, 2013.
- [24] U. S. University, “AMERICAN Engineering Data.”
- [25] D. Bouman, “Hydraulic design for gravity based water schemes,” no. April, 2014.
- [26] B. Monta, “Análisis económico de la desalinización.”
- [27] N. Voutchkov, *Desalination engineering, planing and design*. 2013.
- [28] International Atomic Energy Agency, *DEEP 5 User Manual*. 2013.
- [29] F. Urrutia, “Evolución global de la capacidad instalada de plantas desaladoras,” 2005.
- [30] M. Shatat and S. B. Riffat, “Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources,” *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–19, 2014.
- [31] “Teorema del Valor Medio para integrales.” [Online]. Available: <http://www.fca.unl.edu.ar/Intdef/TeoremaValorMedio.htm>.
- [32] K. . Chartzoulakis, N. . Paranychianakis, and A. . Angelakis, “Water resources management in the Island of Crete, Greece, with emphasis on the agricultural use,” 2001.
- [33] E. Kampragou, H. Grigoropoulou, and D. Assimacopoulos, “Treated Wastewater Reuse Potential : Mitigating Water,” *Water Resour.*, pp. 1–10, 2014.
- [34] T. Asano *et al.*, *Water reuse, issues, technologies and applications*. .
- [35] M. Papapetrou, M. Wieghaus, and C. Biercamp, “Roadmap for the development of desalination powered by renewable energy,” *ProDes Proj.*, p. 79, 2010.

ANEXO A

CALIDAD DE AGUA

1. PARÁMETROS PARA LA CALIDAD DE AGUA POTABLE.

| Parámetro | Valor paramétrico | Unidad | Notas |
|----------------|-------------------|--------|---|
| Acrilamida | 0.1 | µg/l | El valor del parámetro se refiere a la concentración monomérica residual en el agua, calculada con arreglo a las características de la migración máxima del polímero correspondiente en contacto con el agua. (Nota 1) |
| Antimonio | 5 | µg/l | |
| Arsénico | 10 | µg/l | |
| Benceno | 1 | µg/l | |
| Benzo(a)pireno | 0.01 | µg/l | |
| Boro | 1 | µg/l | |
| Bromato | 10 | µg/l | <p>Cuando sea posible sin que afecta a la desinfección, los Estados miembros deberán procurar obtener un valor más bajo.</p> <p>Para las aguas a que se refieren las letras a), b) y d) del apartado 1 del artículo 6, el valor se cumplirá, a lo sumo, a los diez años naturales de la fecha de entrada en vigor de la presente Directiva. Para el período comprendido entre el quinto y el décimo año a partir de la entrada en vigor de la presente Directiva, el valor paramétrico de bromato será de 25 µg/l. (Nota 2)</p> |
| Cadmio | 5 | µg/l | |
| Cromo | 50 | µg/l | <p>El valor se aplica a una muestra de agua destinada al consumo humano, obtenida por un método adecuado de muestreo (1) en el grifo y recogida de modo que sea representativa de un valor medio semanal ingerido por los consumidores. Cuando proceda, los métodos de muestreo y control deberán efectuarse de una forma armonizada, que se establecerá con arreglo al apartado 4 del artículo 7. Los Estados miembros tendrán en cuenta la presencia de valores punta que puedan provocar efectos adversos en la salud humana. (Nota 3)</p> |

| | | | |
|------------------|-----|------|---|
| Cobre | 2 | µg/l | (Nota 3) |
| Cianuro | 50 | µg/l | |
| 1,2-dicloroetano | 3 | µg/l | |
| Epíclorhidrina | 0.1 | µg/l | (Nota 1) |
| Fluoruro | 1.5 | µg/l | |
| Plomo | 10 | µg/l | <p>(Nota 3) + Para las aguas a que se refieren las letras a), b) y d) del apartado 1 del artículo 6, el valor se cumplirá, a lo sumo, a los quince años naturales de la fecha de entrada en vigor de la presente Directiva. Para el período comprendido entre el quinto y el decimoquinto año a partir de la entrada en vigor de la presente Directiva, el valor del parámetro plomo será de 25 µg/l.</p> <p>Los Estados miembros velarán por que se adopten todas las disposiciones apropiadas a fin de reducir cuanto sea posible la concentración de plomo en las aguas destinadas al consumo humano durante el plazo necesario para cumplir el valor de este parámetro. Al poner en práctica las medidas necesarias para cumplir este valor, los Estados miembros darán progresivamente prioridad a las zonas con máximas concentraciones de plomo en las aguas destinadas al consumo humano.</p> |
| Mercurio | 1 | µg/l | |
| Níquel | 20 | µg/l | (Nota 3) |
| Nitrato | 50 | µg/l | <p>(Nota 5) Los Estados miembros velarán por que a la salida de las instalaciones de tratamiento de aguas se respete la cifra de 0,10 mg/l para los nitritos y se cumpla la condición de que $[\text{nitrato}]/50 + [\text{nitrito}]/3 \leq 1$, donde los corchetes significan concentraciones en mg/l para el nitrato (NO₃) y para el nitrito (NO₂).</p> |
| Nitrito | 0.5 | µg/l | (Nota 5) |
| Plaguicidas | 0.1 | µg/l | <p>Por «plaguicidas» se entiende:</p> <ul style="list-style-type: none"> — insecticidas orgánicos, — herbicidas orgánicos, — fungicidas orgánicos, — nematocidas orgánicos, — acaricidas orgánicos, |

| | | | |
|---------------------------------------|-----|------|---|
| | | | <p>— alguicidas orgánicos,</p> <p>— rodenticidas orgánicos,</p> <p>— molusquicidas orgánicos,</p> <p>— productos relacionados (entre otros, reguladores de crecimiento) y sus pertinentes metabolitos y productos de degradación y reacción.</p> <p>Sólo es preciso controlar aquellos plaguicidas que sea probable que estén presentes en un suministro dado. (Nota 6) El valor paramétrico se aplica a cada uno de los plaguicidas. En el caso de la aldrina, la dieldrina, el heptacloro y el heptaclorepóxido, el valor paramétrico es de 0,030 µg/l. (Nota 7)</p> |
| Total plaguicidas | 0.5 | µg/l | <p>(Nota 6) + Por «total plaguicidas» se entiende la suma de todos los plaguicidas detectados y cuantificados en el procedimiento de control. (Nota 8)</p> |
| Hidrocarburos policíclicos aromáticos | 0.1 | µg/l | <p>Suma de concentraciones de compuestos especificados; Los compuestos especificados son:</p> <p>— benzo(b)fluoranteno</p> <p>— benzo(k)fluoranteno</p> <p>— benzo(ghi)perileno</p> <p>— indeno(1,2,3-cd) pireno (Nota 9)</p> |
| Selenio | 10 | µg/l | |
| Tetracloroeteno y tricloroeteno | 10 | µg/l | <p>Suma de concentraciones de parámetros especificados</p> |
| Total trihalometanos | 100 | µg/l | <p>Suma de concentraciones de compuestos especificados; Cuando sea posible sin que afecte a la desinfección, los Estados miembros deberán procurar obtener un valor más bajo.</p> <p>Los compuestos especificados son: cloroformo, bromoformo, dibromoclorometano, bromodiclorometano.</p> <p>Para las aguas a que refieren las letras a), b) y d) del apartado 1 del artículo 6, el valor se cumplirá, a lo sumo, a los diez años naturales de la fecha de entrada en vigor de la presente Directiva. Para el período comprendido entre el quinto y el décimo año a partir de la entrada en vigor de la presente Directiva, el valor paramétrico de THM totales será de 150 µg/l.</p> <p>Los Estados miembros se cerciorarán de que se adopten todas las medidas adecuadas para reducir la concentración de THM en el agua destinada al consumo humano en la mayor medida posible durante el período necesario para lograr el cumplimiento del valor</p> |

| | | | |
|-------------------|-----|------|--|
| | | | paramétrico. Al aplicar las medidas necesarias para cumplir este valor, los Estados miembros darán progresivamente prioridad a las zonas con máximas concentraciones de THM en el agua destinada al consumo humano. (Nota 10) |
| Cloruro de vinilo | 0.5 | µg/l | (Nota 1) |

Parámetros indicadores

| Parámetro | Valor paramétrico | Unidad | Notas |
|----------------------------------|--|----------------|---|
| Aluminio | 200 | µg/l | |
| Amonio | 0.5 | mg/l | |
| Cloruro | 250 | mg/l | El agua no deberá contener materias corrosivas. (Nota 1) |
| Clostridium perfringens | 0 | número/100ml | Este parámetro es necesario medirlo sólo si el agua procede total o parcialmente de agua superficial. En caso de incumplimiento de este valor paramétrico, el Estado miembro afectado investigará el suministro para asegurarse de que de la presencia de microorganismos patógenos como, por ejemplo, el cryptosporidium no se desprende peligro potencial alguno para la salud humana. Los Estados miembros incluirán en su informe los resultados de todas estas investigaciones, de conformidad con el apartado 2 del artículo 13. (Nota 2) |
| Color | Aceptable para los consumidores sin cambios anómalos | | |
| Conductividad | 2500 | µS cm-1 a 20°C | (Nota 1) |
| Concentración en iones hidrógeno | >6,5 y <9,5 | Unidades pH | (Nota 1) Para el agua sin gas envasada en botellas u otros recipientes, el valor mínimo podrá reducirse a 4,5 unidades pH. Para el agua envasada en botellas u otros recipientes que sea naturalmente rica en dióxido de carbono o con adición artificial de éste, el valor mínimo podrá ser inferior. (Nota 3) |

| | | | |
|-----------------------------|--|---------------------|---|
| Hierro | 200 | µg/l | |
| Manganeso | 50 | µg/l | |
| Olor | Aceptable para los consumidores y sin cambios anómalos | | |
| Oxidabilidad | 5 | mg/l O ₂ | No es necesario medir este parámetro si se analiza el parámetro COT. (Nota 4) |
| Sulfato | 250 | mg/l | (Nota 1) |
| Sodio | 200 | mg/l | |
| Sabor | Aceptable para los consumidores y sin cambios anómalos | | |
| Recuento de colonias a 22°C | Sin cambios anómalos | número/100ml | |
| Bacterias coliformes | 0 | | Para las aguas envasadas en botellas u otros recipientes, la unidad es número/250 ml. (Nota 5) |
| Carbono orgánico total | Sin cambios anómalos | | No es necesario medir este parámetro para suministros de menos de 10 000 m ³ por día. (Nota 6) |
| Turbidez | 1 | NTU | Cuando se trate de tratamiento de aguas superficiales, los Estados miembros deberán intentar lograr un valor paramétrico no superior a 1,0 NTU (unidades nefelométricas de turbidez) en el agua a la salida de las instalaciones de tratamiento. (Nota 7) |

Parámetros radioactivos

| Parámetro | Valor paramétrico | Unidad | Notas |
|-----------|-------------------|--------|---|
| Tritio | 100 | Bq/l | (Nota 8) Excluido el tritio, el potasio -40, el radón y los productos de desintegración del radón. La periodicidad del control, los métodos de control y los lugares más adecuados para la toma de muestras se indicarán posteriormente en el anexo II. (Nota 10) |

| | | | |
|---------------------------|-----|---------|--|
| Dosis indicativa total | 0.1 | mSv/año | <p>(Nota 9) 1. La Comisión adoptará las propuestas requeridas en virtud de la nota 8, sobre la periodicidad del control, y de la nota 9 sobre la periodicidad del control, los métodos de control y los lugares más adecuados para los puntos de control, que se indican en el anexo II. Estas medidas, destinadas a modificar elementos no esenciales de la Directiva, se adoptarán con arreglo al procedimiento de reglamentación con control contemplado en el artículo 12, apartado 3.</p> <p>Al elaborar dichas propuestas, la Comisión tomará en consideración, entre otras, las disposiciones pertinentes con arreglo a la legislación existente o a los programas de control adecuados, incluidos los resultados del control que se deriven de los mismos. ◀</p> <p>2. No será necesario que los Estados miembros controlen el agua potable respecto del tritio ni la radiactividad para establecer la dosis indicativa total cuando consideren que sobre la base de otros controles llevados a cabo los niveles de tritio o de la dosis indicativa total del agua se encuentran muy por debajo del valor paramétrico. En ese caso comunicará las razones de su decisión a la Comisión, incluyendo los resultados de esos otros controles llevados a cabo. (Nota 10)</p> |
|---------------------------|-----|---------|--|

2. CALIDAD DE AGUA DE ANAVALSA.

| Parámetro | Valor paramétrico | Unidad | Estado agua potable |
|---------------------------------------|-------------------|--------|---------------------|
| Acrilamida | 0.019 | µg/l | OK |
| Antimonio | 0.9 | µg/l | OK |
| Arsénico | 4.4 | µg/l | OK |
| Benceno | 0.1 | µg/l | OK |
| Benzo(a)pireno | 0.0024 | µg/l | OK |
| Boro | 0.09 | mg/l | OK |
| Bromato | 1.9 | µg/l | OK |
| Cadmio | 0.09 | µg/l | OK |
| Cromo | 2.36 | µg/l | OK |
| Cobre | 21.5 | µg/l | ALARMA |
| Cianuro | 9.9 | µg/l | OK |
| 1,2-dicloroetano | 0 | µg/l | OK |
| Epiclorhidrina | 0.019 | µg/l | OK |
| Fluoruro | 0.35 | mg/l | OK |
| Plomo | 1.2 | µg/l | OK |
| Mercurio | 0.19 | µg/l | OK |
| Níquel | 8 | µg/l | OK |
| Nitrato | 2.9 | µg/l | OK |
| Nitrito | 0.029 | µg/l | OK |
| Plaguicidas | 0 | µg/l | OK |
| Total plaguicidas | 0 | µg/l | OK |
| Hidrocarburos policíclicos aromáticos | 0.0024 | µg/l | OK |
| Selenio | | µg/l | OK |

| | | | |
|---------------------------------|------|------|----|
| Tetracloroetano y tricloroetano | 0.18 | µg/l | OK |
| Total trihalometanos | 7.5 | µg/l | OK |
| Cloruro de vinilo | 0 | µg/l | OK |

Parámetros indicadores

| Parámetro | Valor paramétrico | Unidad | Estado |
|----------------------------------|-------------------|----------------|--------|
| Aluminio | 15 | µg/l | OK |
| Amonio | 0.029 | mg/l | OK |
| Cloruro | 401 | mg/l | ALARMA |
| Clostridium perfringens | 0 | número/100ml | OK |
| Color | 0 | | OK |
| Conductividad | 1788 | µS cm-1 a 20°C | OK |
| Concentración en iones hidrógeno | 7.5 | Unidades pH | OK |
| Hierro | 24 | µg/l | OK |
| Manganeso | 0.5 | µg/l | OK |
| Olor | 0 | | OK |
| Oxidabilidad | 0.49 | mg/l O2 | OK |
| Sulfato | 38 | mg/l | OK |
| Sodio | 180 | mg/l | OK |
| Sabor | 0 | | OK |
| Recuento de colonias a 22°C | 0 | número/100ml | OK |
| Bacterias coliformes | 0 | | OK |
| Carbono orgánico total | 4.9 | | OK |

| | | | |
|----------|------|--|----|
| Turbidez | 0.36 | | OK |
|----------|------|--|----|

Radioactividad

| Parámetro | Valor paramétrico | Unidad | Estado |
|------------------------|-------------------|---------|--------|
| Tritio | 0 | Bq/l | OK |
| Dosis indicativa total | 0 | mSv/año | OK |

ANEXO B

CONFIGURACIÓN DE LAS TUBERÍAS DE TRANSPORTE DE AGUA POTABLE (ALTERNATIVA 1)

Conexión Aspous-Achilli

Transporte por bombeo

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|-------------------|
| Distancia | 1,392.84 | m |
| Q | 0.02 | m ³ /s |
| z0 | 0.00 | m |
| z1 | 0.00 | m |

| Iteraciones |
|-------------|
|-------------|

| F1 | D | F' |
|-------|-------|-------|
| 0.01 | 0.166 | 0.023 |
| 0.015 | 0.178 | 0.023 |
| 0.02 | 0.187 | 0.023 |
| 0.025 | 0.194 | 0.023 |
| 0.03 | 0.201 | 0.023 |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|------------|----------|
| Diámetro | 0.19 | m |
| f | 0.03 | |
| Velocidad | 0.82 | m/s |
| Reynolds | 149,801.27 | |
| hg | 0.00 | m |
| ho | 6.37 | m |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|------------|-----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 445,530.76 | euros | 36,670.75 | euros/año |
| Potencia necesaria | 1.69 | kW | | |
| Coste bombas | 8,138.54 | euros | 669.87 | euros/año |
| Coste bombeo/año | 5,753.46 | euros/año | | |
| Coste total anualizado | 43,094.08 | euros | | |

Conexión Ferekampos - Aspous

Transporte por gravedad

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|-------------------|
| Distancia | 1,878.83 | m |
| Q | 0.07 | m ³ /s |
| z0 | 80.00 | m |
| z1 | 0.00 | m |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|------------|----------|
| Diámetro | 0.19 | m |
| Velocidad | 2.51 | m/s |
| Reynolds | 455,545.09 | |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|------------|----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 596,058.55 | euros | 49,060.40 | euros/año |
| Coste total anualizado | 49,060.40 | euros | | |

Conexión Ferekampos - Skyros

Transporte por gravedad

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|-------------------|
| Distancia | 3,001.67 | m |
| Q | 0.91 | m ³ /s |
| z0 | 80.00 | m |
| z1 | 60.00 | m |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|--------------|----------|
| Diámetro | 0.75 | m |
| Velocidad | 2.07 | m/s |
| Reynolds | 1,515,001.74 | |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|--------------|----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 8,613,660.26 | euros | 708,973.29 | euros/año |
| Coste total anualizado | 708,973.29 | euros | | |

Conexión Skyros - Molos

Transporte por gravedad

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|-------------------|
| Distancia | 1,456.02 | m |
| Q | 0.26 | m ³ /s |
| z0 | 60.00 | m |
| z1 | 0.00 | m |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|--------------|----------|
| Diámetro | 0.31 | m |
| Velocidad | 3.43 | m/s |
| Reynolds | 1,046,659.81 | |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|------------|----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 992,625.04 | euros | 81,701.00 | euros/año |
| Coste total anualizado | 81,701.00 | euros | | |

Conexión Embalse2 - Linaria

Transporte por gravedad

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|-------------------|
| Distancia | 776.21 | m |
| Q | 0.04 | m ³ /s |
| z0 | 200.00 | m |
| z1 | 0.00 | m |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|------------|----------|
| Diámetro | 0.11 | m |
| Velocidad | 4.47 | m/s |
| Reynolds | 482,413.44 | |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|------------|----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 152,259.78 | euros | 12,532.20 | euros/año |
| Coste total anualizado | 12,532.20 | euros | | |

Conexión Embalse2 - Acherounes

Transporte por gravedad

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|-------------------|
| Distancia | 1,025.91 | m |
| Q | 0.03 | m ³ /s |
| z0 | 200.00 | m |
| z1 | 100.00 | m |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|------------|----------|
| Diámetro | 0.11 | m |
| Velocidad | 2.77 | m/s |
| Reynolds | 305,196.42 | |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|------------|----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 204,485.00 | euros | 16,830.75 | euros/año |
| Coste total anualizado | 16,830.75 | euros | | |

Conexión Embalse2 - Kalikri

Transporte por gravedad

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|-------------------|
| Distancia | 1,520.69 | m |
| Q | 0.05 | m ³ /s |
| z0 | 200.00 | m |
| z1 | 100.00 | m |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|------------|----------|
| Diámetro | 0.15 | m |
| Velocidad | 2.75 | m/s |
| Reynolds | 407,636.35 | |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|------------|----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 394,452.13 | euros | 32,466.57 | euros/año |
| Coste total anualizado | 32,466.57 | euros | | |

Conexión Kalikri - Kalamitsa

Transporte por gravedad

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|-------------------|
| Distancia | 282.84 | m |
| Q | 0.03 | m ³ /s |
| z0 | 100.00 | m |
| z1 | 0.00 | m |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|------------|----------|
| Diámetro | 0.09 | m |
| Velocidad | 4.68 | m/s |
| Reynolds | 422.834.90 | |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|-----------|----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 47,548.43 | euros | 3,913.62 | euros/año |
| Coste total anualizado | 3,913.62 | euros | | |

Conexión Kalamitsa - Nifi

Transporte por bombeo

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|-------------------|
| Distancia | 1,216.55 | m |
| Q | 0.01 | m ³ /s |
| z0 | 0.00 | m |
| z1 | 0.00 | m |

| Iteraciones | | | |
|-------------|-------|-------|--|
| F1 | D | F' | |
| 0.01 | 0.126 | 0.025 | |
| 0.015 | 0.135 | 0.025 | |
| 0.02 | 0.142 | 0.024 | |
| 0.025 | 0.148 | 0.024 | |
| 0.03 | 0.152 | 0.024 | |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|------------|----------|
| Diámetro | 0.15 | m |
| f | 0.03 | |
| Velocidad | 0.77 | m/s |
| Reynolds | 110,968.08 | |
| hg | 0.00 | m |
| ho | 6.20 | m |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|-------------------------------|------------|-----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 307,884.23 | euros | 25,341.34 | euros/año |
| Potencia necesaria | 0.96 | kW | | |
| Coste bombas | 5,416.92 | euros | 445.86 | euros/año |
| Coste bombeo/año | 3,276.42 | euros/año | | |
| Coste total anualizado | 29,063.62 | euros | | |

ANEXO C

CONFIGURACIÓN DE LAS TUBERÍAS DE TRANSPORTE DE AGUA RESIDUAL (ALTERNATIVA 1 Y 2)

Conexión Achilli - Aspous

Transporte por bombeo

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|-------------------|
| Distancia | 1,392.84 | m |
| Q | 0.01 | m ³ /s |
| z0 | 0.00 | m |
| z1 | 0.00 | m |

| Iteraciones | | | |
|-------------|-------|-------|-------|
| | F1 | D | F' |
| | 0.01 | 0.084 | 0.028 |
| | 0.015 | 0.090 | 0.028 |
| | 0.02 | 0.094 | 0.027 |
| | 0.025 | 0.098 | 0.027 |
| | 0.03 | 0.101 | 0.027 |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|-----------|----------|
| Diámetro | 0.10 | m |
| f | 0.03 | |
| Velocidad | 0.78 | m/s |
| Reynolds | 74,794.91 | |
| hg | 0.00 | m |
| ho | 11.13 | m |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|------------|-----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 245,520.38 | euros | 20,208.30 | euros/año |
| Potencia necesaria | 0.77 | kW | | |
| Coste bombas | 4,612.72 | euros | 379.66 | euros/año |
| Coste bombeo/año | 2,623.40 | euros/año | | |
| Coste total anualizado | 23,211.36 | euros | | |

Conexión Aspous - Skyros

Transporte por bombeo

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|-------------------|
| Distancia | 2,469.82 | m |
| Q | 0.02 | m ³ /s |
| z0 | 0.00 | m |
| z1 | 60.00 | m |

Iteraciones

| F1 | D | F' |
|-------|-------|-------|
| 0.01 | 0.147 | 0.024 |
| 0.015 | 0.158 | 0.024 |
| 0.02 | 0.166 | 0.023 |
| 0.025 | 0.172 | 0.023 |
| 0.03 | 0.177 | 0.023 |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|------------|----------|
| Diámetro | 0.17 | m |
| f | 0.03 | |
| Velocidad | 0.76 | m/s |
| Reynolds | 128,325.64 | |
| hg | 60.00 | m |
| ho | 70.67 | m |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|------------|-----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 722,095.67 | euros | 59,434.26 | euros/año |
| Potencia necesaria | 14.80 | kW | | |
| Coste bombas | 39,014.17 | euros | 3,211.18 | euros/año |
| Coste bombeo/año | 50,279.28 | euros/año | | |
| Coste total anualizado | 112,924.72 | euros | | |

Conexión Skyros – WWTP1

Transporte por gravedad

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|----------|
| Distancia | 707.11 | m |
| Q | 0.20 | m3/s |
| z0 | 60.00 | m |
| zl | 0.00 | m |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|--------------|----------|
| Diámetro | 0.25 | m |
| Velocidad | 4.24 | m/s |
| Reynolds | 1,019,093.94 | |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|------------|----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 328,755.22 | euros | 27,059.19 | euros/año |
| Coste total anualizado | 27,059.19 | euros | | |

Conexión Kalikri - Linaria

Transporte por gravedad

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|----------|
| Distancia | 1,772.00 | m |
| Q | 0.01 | m3/s |
| z0 | 100.00 | m |
| zl | 0.00 | m |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|------------|----------|
| Diámetro | 0.09 | m |
| Velocidad | 1.88 | m/s |
| Reynolds | 172,043.01 | |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|------------|----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 301,424.13 | euros | 24,809.62 | euros/año |
| Coste total anualizado | 24,809.62 | euros | | |

Conexión Aspous - Skyros

Transporte por bombeo

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|-------------------|
| Distancia | 860.23 | m |
| Q | 0.07 | m ³ /s |
| z0 | 0.00 | m |
| z1 | 0.00 | m |

Iteraciones

| F1 | D | F' |
|-------|------|------|
| 0.01 | 0.29 | 0.02 |
| 0.015 | 0.31 | 0.02 |
| 0.02 | 0.33 | 0.02 |
| 0.025 | 0.34 | 0.02 |
| 0.03 | 0.35 | 0.02 |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|------------|----------|
| Diámetro | 0.33 | m |
| f | 0.03 | |
| Velocidad | 0.80 | m/s |
| Reynolds | 257,967.65 | |
| hg | 0.00 | m |
| ho | 2.12 | m |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|------------|-----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 643,484.49 | euros | 52,963.93 | euros/año |
| Potencia necesaria | 1.71 | kW | | |
| Coste bombas | 8,202.35 | euros | 675.12 | euros/año |
| Coste bombeo/año | 5,815.94 | euros/año | | |
| Coste total anualizado | 59,454.99 | euros | | |

Conexión Molos – WWTP1

Transporte por bombeo

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|-------------------|
| Distancia | 2,469.82 | m |
| Q | 0.02 | m ³ /s |
| z0 | 0.00 | m |
| z1 | 60.00 | m |

| Iteraciones | | | |
|-------------|-------|-------|--|
| F1 | D | F' | |
| 0.01 | 0.147 | 0.024 | |
| 0.015 | 0.158 | 0.024 | |
| 0.02 | 0.166 | 0.023 | |
| 0.025 | 0.172 | 0.023 | |
| 0.03 | 0.177 | 0.023 | |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|------------|----------|
| Diámetro | 0.17 | m |
| f | 0.03 | |
| Velocidad | 0.76 | m/s |
| Reynolds | 128,325.64 | |
| hg | 60.00 | m |
| ho | 70.67 | m |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|------------|-----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 722,095.67 | euros | 59,434.26 | euros/año |
| Potencia necesaria | 14.80 | kW | | |
| Coste bombas | 39,014.17 | euros | 3,211.18 | euros/año |
| Coste bombeo/año | 50,279.28 | euros/año | | |
| Coste total anualizado | 112,924.72 | euros | | |

Conexión Nifi - Kalamitsa

Transporte por bombeo

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|-------------|-------------------|
| Distancia | 1216.552506 | m |
| Q | 0.00343999 | m ³ /s |
| z0 | 0 | m |
| z1 | 0 | m |

Iteraciones

| F1 | D | F' |
|-------|-------|-------|
| 0.01 | 0.064 | 0.030 |
| 0.015 | 0.068 | 0.030 |
| 0.02 | 0.072 | 0.030 |
| 0.025 | 0.074 | 0.029 |
| 0.03 | 0.077 | 0.029 |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|-----------|----------|
| Diámetro | 0.08 | m |
| f | 0.025 | |
| Velocidad | 0.7449946 | m/s |
| Reynolds | 5.58E+04 | |
| hg | 0 | m |
| ho | 11.220727 | m |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|-----------|-----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 173,708.5 | euros | 14,297.6 | euros/año |
| Potencia necesaria | 0.5 | kW | | |
| Coste bombas | 3,148.4 | euros | 259.1 | euros/año |
| Coste bombeo/año | 1,546.8 | euros/año | | |
| Coste total anualizado | 16,103.6 | euros | | |

Conexión Kalamitsa - Kalikri

Transporte por bombeo

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|-------------------|
| Distancia | 282.84 | m |
| Q | 0.01 | m ³ /s |
| z0 | 0.00 | m |
| z1 | 100.00 | m |

Iteraciones

| F1 | D | F' |
|-------|-------|-------|
| 0.01 | 0.099 | 0.027 |
| 0.015 | 0.106 | 0.026 |
| 0.02 | 0.112 | 0.026 |
| 0.025 | 0.116 | 0.026 |
| 0.03 | 0.120 | 0.026 |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|-----------|----------|
| Diámetro | 0.12 | m |
| f | 0.03 | |
| Velocidad | 0.78 | m/s |
| Reynolds | 88,042.89 | |
| hg | 100.00 | m |
| ho | 101.88 | m |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|-----------|-----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 57,819.37 | euros | 4,759.00 | euros/año |
| Potencia necesaria | 9.87 | kW | | |
| Coste bombas | 29,104.60 | euros | 2,395.54 | euros/año |
| Coste bombeo/año | 33,525.19 | euros/año | | |
| Coste total anualizado | 40,679.73 | euros | | |

Conexión Linaria – WWTP2

Transporte por bombeo

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|-------------------|
| Distancia | 707.11 | m |
| Q | 0.03 | m ³ /s |
| z0 | 0.00 | m |
| z1 | 0.00 | m |

| Iteraciones | | | |
|-------------|-------|-------|--|
| F1 | D | F' | |
| 0.01 | 0.178 | 0.023 | |
| 0.015 | 0.191 | 0.023 | |
| 0.02 | 0.201 | 0.022 | |
| 0.025 | 0.209 | 0.022 | |
| 0.03 | 0.215 | 0.022 | |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|------------|----------|
| Diámetro | 0.22 | m |
| f | 0.03 | |
| Velocidad | 0.71 | m/s |
| Reynolds | 149,475.02 | |
| hg | 0.00 | m |
| ho | 2.12 | m |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|------------|-----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 269,538.41 | euros | 22,185.17 | euros/año |
| Potencia necesaria | 0.65 | kW | | |
| Coste bombas | 4,057.13 | euros | 333.93 | euros/año |
| Coste bombeo/año | 2,196.70 | euros/año | | |
| Coste total anualizado | 24,715.81 | euros | | |

Conexión Acherounes -WWTP2

Transporte por gravedad

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|----------|
| Distancia | 1,000.00 | m |
| Q | 0.01 | m3/s |
| z0 | 100.00 | m |
| z1 | 0.00 | m |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|------------|----------|
| Diámetro | 0.08 | m |
| Velocidad | 1.81 | m/s |
| Reynolds | 125,804.38 | |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|------------|----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 134,076.10 | euros | 11,035.54 | euros/año |
| Coste total anualizado | 11,035.54 | euros | | |

ANEXO D

CONEXIÓN DESALINIZADORAS - EMBALSES

Conexión DP1 - Ferekampos

Transporte por bombeo

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|-------------------|
| Distancia | 2,624.88 | m |
| Q | 0.02 | m ³ /s |
| z0 | 0.00 | m |
| z1 | 80.00 | m |

| Iteraciones | | | |
|-------------|-------|-------|--|
| F1 | D | F' | |
| 0.01 | 0.163 | 0.023 | |
| 0.015 | 0.175 | 0.023 | |
| 0.02 | 0.184 | 0.023 | |
| 0.025 | 0.191 | 0.023 | |
| 0.03 | 0.197 | 0.023 | |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|------------|----------|
| Diámetro | 0.18 | m |
| f | 0.03 | |
| Velocidad | 0.82 | m/s |
| Reynolds | 147,229.92 | |
| hg | 80.00 | m |
| ho | 92.24 | m |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|------------|-----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 822,782.58 | euros | 67,721.60 | euros/año |
| Potencia necesaria | 23.68 | kW | | |
| Coste bombas | 54,796.98 | euros | 4,510.23 | euros/año |
| Coste bombeo/año | 80,435.44 | euros/año | | |
| Coste total anualizado | 152,667.27 | euros | | |

Conexión DP2 – Embalse 2

Transporte por bombeo

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|-------------------|
| Distancia | 1,530.52 | m |
| Q | 0.01 | m ³ /s |
| z0 | 0.00 | m |
| z1 | 200.00 | m |

Iteraciones

| F1 | D | F' |
|-------|-------|-------|
| 0.01 | 0.086 | 0.028 |
| 0.015 | 0.092 | 0.027 |
| 0.02 | 0.097 | 0.027 |
| 0.025 | 0.101 | 0.027 |
| 0.03 | 0.104 | 0.027 |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|-----------|----------|
| Diámetro | 0.10 | m |
| f | 0.03 | |
| Velocidad | 0.78 | m/s |
| Reynolds | 76,990.52 | |
| hg | 200.00 | m |
| ho | 211.83 | m |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|------------|-----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 276,967.11 | euros | 22,796.61 | euros/año |
| Potencia necesaria | 15.60 | kW | | |
| Coste bombas | 40,514.39 | euros | 3,334.66 | euros/año |
| Coste bombeo/año | 52,972.94 | euros/año | | |
| Coste total anualizado | 79,104.21 | euros | | |

ANEXO E

CONFIGURACIÓN DE LAS TUBERÍAS DE TRANSPORTE DE AGUA POTABLE (ALTERNATIVA 2)

Conexión DP1 – Skyros (1)

Transporte por bombeo

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|-------------------|
| Distancia | 707.11 | m |
| Q | 0.19 | m ³ /s |
| z0 | 0.00 | m |
| z1 | 60.00 | m |

| Iteraciones |
|-------------|
|-------------|

| F1 | D | F' |
|-------|-------|-------|
| 0.01 | 0.499 | 0.018 |
| 0.015 | 0.535 | 0.018 |
| 0.02 | 0.562 | 0.018 |
| 0.025 | 0.584 | 0.018 |
| 0.03 | 0.602 | 0.017 |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|------------|----------|
| Diámetro | 0.56 | m |
| f | 0.03 | |
| Velocidad | 0.78 | m/s |
| Reynolds | 428,270.70 | |
| hg | 60.00 | m |
| ho | 60.98 | m |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|-----------------------|--------------|----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 1,263,390.11 | euros | 118,046.31 | euros/año |
| Potencia necesaria | 139.24 | kW | | |
| Coste bombas | 197,245.08 | euros | 18,429.82 | euros/año |

| | | |
|------------------------|------------|-----------|
| Coste bombeo/año | 472,944.89 | euros/año |
| Coste total anualizado | 609,421.03 | euros |

Conexión DP1 – Skyros (2)

Transporte por bombeo

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|-------------------|
| Distancia | 707.11 | m |
| Q | 0.37 | m ³ /s |
| z0 | 0.00 | m |
| z1 | 60.00 | m |

Iteraciones

| F1 | D | F' |
|-------|-------|-------|
| 0.01 | 0.691 | 0.017 |
| 0.015 | 0.741 | 0.016 |
| 0.02 | 0.778 | 0.016 |
| 0.025 | 0.808 | 0.016 |
| 0.03 | 0.834 | 0.016 |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|------------|----------|
| Diámetro | 0.74 | m |
| f | 0.03 | |
| Velocidad | 0.85 | m/s |
| Reynolds | 613,622.04 | |
| hg | 60.00 | m |
| ho | 60.88 | m |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|--------------|-----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 1,987,915.26 | euros | 185,743.16 | euros/año |
| Potencia necesaria | 262.49 | kW | | |
| Coste bombas | 311,952.62 | euros | 29,147.65 | euros/año |
| Coste bombeo/año | 891,592.98 | euros/año | | |
| Coste total anualizado | 1,106,483.79 | euros | | |

Conexión DP1 – Skyros (3)

Transporte por bombeo

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|-------------------|
| Distancia | 707.11 | m |
| Q | 0.35 | m ³ /s |
| z0 | 0.00 | m |
| z1 | 60.00 | m |

| Iteraciones | | | |
|-------------|-------|-------|--|
| F1 | D | F' | |
| 0.01 | 0.681 | 0.017 | |
| 0.015 | 0.729 | 0.017 | |
| 0.02 | 0.766 | 0.016 | |
| 0.025 | 0.796 | 0.016 | |
| 0.03 | 0.821 | 0.016 | |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|------------|----------|
| Diámetro | 0.73 | m |
| f | 0.03 | |
| Velocidad | 0.85 | m/s |
| Reynolds | 604,687.88 | |
| hg | 60.00 | m |
| ho | 60.89 | m |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|--------------|-----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 1,938,428.82 | euros | 181,119.34 | euros/año |
| Potencia necesaria | 254.79 | kW | | |
| Coste bombas | 305,308.49 | euros | 28,526.85 | euros/año |
| Coste bombeo/año | 865,435.58 | euros/año | | |
| Coste total anualizado | 1,075,081.77 | euros | | |

Conexión Aspous - Achilli

Transporte por bombeo

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|-------------------|
| Distancia | 1,392.84 | m |
| Q | 0.02 | m ³ /s |
| z0 | 0.00 | m |
| z1 | 0.00 | m |

| Iteraciones | | | |
|-------------|-------|-------|-------|
| | F1 | D | F' |
| | 0.01 | 0.166 | 0.023 |
| | 0.015 | 0.178 | 0.023 |
| | 0.02 | 0.187 | 0.023 |
| | 0.025 | 0.194 | 0.023 |
| | 0.03 | 0.201 | 0.023 |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|------------|----------|
| Diámetro | 0.19 | m |
| f | 0.03 | |
| Velocidad | 0.76 | m/s |
| Reynolds | 144,209.83 | |
| hg | 0.00 | m |
| ho | 5.27 | m |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|------------|-----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 465,748.66 | euros | 43,517.76 | euros/año |
| Potencia necesaria | 1.40 | kW | | |
| Coste bombas | 7,092.91 | euros | 662.73 | euros/año |
| Coste bombeo/año | 4,756.91 | euros/año | | |
| Coste total anualizado | 48,937.41 | euros | | |

Conexión Skyros - Molos

Transporte por gravedad

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|-------------------|
| Distancia | 1,456.02 | m |
| Q | 0.26 | m ³ /s |
| z0 | 60.00 | m |
| z1 | 0.00 | m |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|--------------|----------|
| Diámetro | 0.31 | m |
| Velocidad | 3.43 | m/s |
| Reynolds | 1,046,659.81 | |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|------------|----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 992,625.04 | euros | 92,747.07 | euros/año |
| Coste total anualizado | 92,747.07 | euros | | |

Conexión Acherounes - Linaria

Transporte por gravedad

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|-------------------|
| Distancia | 1,025.91 | m |
| Q | 0.09 | m ³ /s |
| z0 | 100.00 | m |
| z1 | 0.00 | m |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|------------|----------|
| Diámetro | 0.18 | m |
| Velocidad | 3.71 | m/s |
| Reynolds | 646,167.54 | |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|------------|----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 311,316.06 | euros | 29,088.18 | euros/año |
| Coste total anualizado | 29,088.18 | euros | | |

Conexión DP2 - Acherounes

Transporte por bombeo

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|-------------------|
| Distancia | 538.52 | m |
| Q | 0.12 | m ³ /s |
| z0 | 0.00 | m |
| z1 | 100.00 | m |

Iteraciones

| F1 | D | F' |
|-------|-------|-------|
| 0.01 | 0.392 | 0.019 |
| 0.015 | 0.420 | 0.019 |
| 0.02 | 0.441 | 0.019 |
| 0.025 | 0.458 | 0.018 |
| 0.03 | 0.472 | 0.018 |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|------------|----------|
| Diámetro | 0.44 | m |
| f | 0.03 | |
| Velocidad | 0.79 | m/s |
| Reynolds | 339,518.55 | |
| hg | 100.00 | m |
| ho | 100.97 | m |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|------------|-----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 645,534.95 | euros | 60,316.30 | euros/año |
| Potencia necesaria | 143.34 | kW | | |
| Coste bombas | 201,427.12 | euros | 18,820.58 | euros/año |
| Coste bombeo/año | 486,870.27 | euros/año | | |
| Coste total anualizado | 566,007.15 | euros | | |

Conexión Linaria - Kalikri

Transporte por bombeo

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|-------------------|
| Distancia | 538.52 | m |
| Q | 0.05 | m ³ /s |
| z0 | 0.00 | m |
| z1 | 100.00 | m |

| Iteraciones |
|-------------|
|-------------|

| F1 | D | F' |
|-------|-------|-------|
| 0.01 | 0.249 | 0.021 |
| 0.015 | 0.267 | 0.021 |
| 0.02 | 0.281 | 0.021 |
| 0.025 | 0.291 | 0.021 |
| 0.03 | 0.301 | 0.020 |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|------------|----------|
| Diámetro | 0.28 | m |
| f | 0.03 | |
| Velocidad | 0.80 | m/s |
| Reynolds | 220,567.96 | |
| hg | 100.00 | m |
| ho | 101.58 | m |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|------------|-----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 308,474.14 | euros | 28,822.64 | euros/año |
| Potencia necesaria | 59.65 | kW | | |
| Coste bombas | 106,862.96 | euros | 9,984.86 | euros/año |
| Coste bombeo/año | 202,605.62 | euros/año | | |
| Coste total anualizado | 241,413.12 | euros | | |

Conexión Kalikri - Nifi

Transporte por bombeo

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|-------------------|
| Distancia | 1,216.55 | m |
| Q | 0.01 | m ³ /s |
| z0 | 0.00 | m |
| z1 | 0.00 | m |

| Iteraciones |
|-------------|
|-------------|

| F1 | D | F' |
|-------|-------|-------|
| 0.01 | 0.126 | 0.025 |
| 0.015 | 0.135 | 0.025 |
| 0.02 | 0.142 | 0.024 |
| 0.025 | 0.148 | 0.024 |
| 0.03 | 0.152 | 0.024 |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|------------|----------|
| Diámetro | 0.15 | m |
| f | 0.03 | |
| Velocidad | 0.77 | m/s |
| Reynolds | 110,968.08 | |
| hg | 0.00 | m |
| ho | 6.20 | m |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|------------|-----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 307,884.23 | euros | 28,767.52 | euros/año |
| Potencia necesaria | 0.96 | kW | | |
| Coste bombas | 5,416.92 | euros | 506.14 | euros/año |
| Coste bombeo/año | 3,276.42 | euros/año | | |
| Coste total anualizado | 32,550.08 | euros | | |

Conexión Kalikri - Kalamitsa

Transporte por gravedad

| Datos propios | Magnitud | Unidades |
|---------------|----------|-------------------|
| Distancia | 776.21 | m |
| Q | 0.03 | m ³ /s |
| z0 | 100.00 | m |
| z1 | 0.00 | m |

| Valores definitivos | Magnitud | Unidades |
|---------------------|------------|----------|
| Diámetro | 0.11 | m |
| Velocidad | 3.18 | m/s |
| Reynolds | 348,830.40 | |

| Resultados económicos | Magnitud | Unidades | Anualizado | Unidades |
|------------------------|------------|----------|------------|-----------|
| Coste tuberías | 154,183.34 | euros | 14,406.30 | euros/año |
| Coste total anualizado | 14,406.30 | euros | | |

ANEXO F

COSTES ELECTRICIDAD Y ENERGÍA TÉRMICA

En este anexo se exponen los costes de la electricidad y la energía térmica producidos por la planta tras una ampliación. La potencia térmica necesaria para desalinización es de 6 MW que en términos de potencia de la planta representan 2 MW. Esto sucede ya que esta potencia térmica debe ser transformada en potencia eléctrica con un rendimiento del 33 por ciento.

A modo pequeña introducción se detallan las tres alternativas expuestas en el proyecto de GENERIS [18]. El escenario 1 consiste en la hibridación de una planta de energía solar concentrada (CSP) incluyendo almacenamiento de energía térmica con turbinas eólicas apoyada por almacenamiento eléctrico. El escenario 2 propone la hibridación de una planta fotovoltaica (PV) con turbinas eólicas, apoyado con almacenamiento de energía eléctrica y generación de hidrógeno. El escenario 3 consiste la misma combinación de plantas que en el escenario 2 pero con una central hidroeléctrica de bombeo. En todos estos casos la ampliación de la planta se realiza en la parte correspondiente a la energía solar (CSP o PV).

Las siguientes tablas muestran los resultados económicos proporcionados por las plantas antes (parte izquierda) y después de su ampliación (parte derecha). En las dos últimas tablas se puede apreciar que la opción más viable económicamente es la segunda opción, ya que además de proporcionar la energía eléctrica tras su ampliación, el coste de la energía térmica destinada a la desalinización es la más barata junto al escenario tres.

Escenario 1

| Planta actual | | CSP | Planta ampliada | |
|--------------------------------|--|--------------------|--------------------------------|--------------------|
| PFI | | 41449819 euros | PFI | 50957419 euros |
| Precio/kW | | 5282 euros/kW | Precio/kW | 5282 euros/kW |
| Potencia | | 7.847372 MW | Potencia | 9.647372018 MW |
| Coste terreno | | 916000 euros | Coste terreno | 1126108.556 euros |
| Terreno | | 183200 m2 | Terreno | 225221.7111 m2 |
| Planta Híbrida | | | Planta Híbrida | |
| Coste del resto de las plantas | | 15568922 euros | Coste del resto de las plantas | 15568922 euros |
| PFI total | | 57018741 euros | PFI total | 66526341 euros |
| TRR | | 10168125 euros/año | TRR | 11565249 euros/año |
| Energía suministrada | | 25000 MWh/año | Energía suministrada | 25000 MWh/año |
| Coste terreno total | | 1519255 euros | Coste terreno total | 1729363.556 euros |

| | | | |
|---------------------|-------------------|---------------------|---------------------|
| Precio electricidad | 406.725 euros/MWh | Precio electricidad | 462.60996 euros/MWh |
|---------------------|-------------------|---------------------|---------------------|

Escenario 2

| | | | |
|--------------------------------|-------------|-----------|--|
| Planta actual | PV | | |
| PFI | 17915100 | euros | |
| Precio/kW | 1706 | euros/kW | |
| Potencia | 10.50123 | MW | |
| Coste terreno | 617645 | euros | |
| Terreno | 123529 | m2 | |
| Planta Híbrida | | | |
| Coste del resto de las plantas | 37534371 | euros | |
| PFI total | 55449471 | euros | |
| TRR | 9610162 | euros/año | |
| Energía suministrada | 25000 | MWh/año | |
| Coste terreno total | 1807940 | euros | |
| Precio electricidad | 384.4065 | euros/MWh | |
| Planta ampliada | | | |
| PFI | 20985900 | euros | |
| Precio/kW | 1706 | euros/kW | |
| Potencia | 12.30123095 | MW | |
| Coste terreno | 723514.5886 | euros | |
| Terreno | 144702.9177 | m2 | |
| Planta Híbrida | | | |
| Coste del resto de las plantas | 37534371 | euros | |
| PFI total | 58520271 | euros | |
| TRR | 10066939 | euros/año | |
| Energía suministrada | 25000 | MWh/año | |
| Coste terreno total | 1913809.589 | euros | |
| Precio electricidad | 402.67756 | euros/MWh | |

Escenario 3

| | | | |
|--------------------------------|-------------|-----------|--|
| Planta actual | PV | | |
| PFI | 17915100 | euros | |
| Precio/kW | 1706 | euros/kW | |
| Potencia | 10.50123 | MW | |
| Coste terreno | 617645 | euros | |
| Terreno | 123529 | m2 | |
| Planta Híbrida | | | |
| Coste del resto de las plantas | 40709396 | euros | |
| PFI total | 58624496 | euros | |
| TRR | 9805051 | euros/año | |
| Energía suministrada | 25000 | MWh/año | |
| Coste terreno total | 1989785 | euros | |
| Precio electricidad | 392.202 | euros/MWh | |
| Planta ampliada | | | |
| PFI | 20985900 | euros | |
| Precio/kW | 1706 | euros/kW | |
| Potencia | 12.30123095 | MW | |
| Coste terreno | 723514.5886 | euros | |
| Terreno | 144702.9177 | m2 | |
| Planta Híbrida | | | |
| Coste del resto de las plantas | 40709396 | euros | |
| PFI total | 61695296 | euros | |
| TRR | 10261706 | euros/año | |
| Energía suministrada | 25000 | MWh/año | |
| Coste terreno total | 2095654.589 | euros | |
| Precio electricidad | 410.46824 | euros/MWh | |

| | | | |
|---------------------------|---------------------|------------------------------|--------------------|
| Coste electricidad | | Coste energía térmica | |
| Escenario 1 | 462.60996 euros/MWh | Escenario 1 | 55.88496 euros/MWh |
| Escenario 2 | 402.67756 euros/MWh | Escenario 2 | 18.27108 euros/MWh |
| Escenario 3 | 410.46824 euros/MWh | Escenario 3 | 18.2662 euros/MWh |

1. COMBINACIONES ALTERNATIVA I.

En las siguientes tablas se presentan los precios de energía eléctrica y térmica que corresponde a cada una de las combinaciones.

Precio de la energía eléctrica

| | | Zona 1 | | |
|--------|-----|--------|--------|--------|
| | | MED | TVC | RO |
| Zona 2 | MED | 404.50 | 394.45 | 387.75 |
| | TVC | 404.50 | 394.45 | 387.75 |
| | RO | 401.15 | 391.11 | 384.41 |

Precio de la energía térmica

| | | Zona 1 | | |
|--------|-----|--------|-------|------|
| | | MED | TVC | RO |
| Zona 2 | MED | 20.09 | 10.05 | 3.35 |
| | TVC | 20.09 | 10.05 | 3.35 |
| | RO | 16.75 | 6.7 | N/A |

| | Potencia eléctrica (MWe) | Potencia calorífica (MWt) | Inversión total (M\$) | Coste mantenimiento anual (M\$) | Energía térmica anual (Mwh) | Energía eléctrica anual (MWh) | Coste inversión anualizado (M\$) | Coste total anualizado (miles de euros) |
|---------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|----------------------------------|---|
| MED-MED | 0.1 | 6 | 4 | 0.44 | 52560 | 876 | 0.373 | 2224.072 |
| MED-TVC | 0.2 | 6 | 4 | 0.44 | 52560 | 1752 | 0.373 | 2578.415 |
| MED-RO | 0.2 | 5 | 4 | 0.55 | 43800 | 1752 | 0.373 | 2359.918 |
| TVC-MED | 0.3 | 3 | 4 | 0.44 | 26280 | 2628 | 0.373 | 2114.227 |
| TVC-TVC | 0.4 | 3 | 4 | 0.44 | 26280 | 3504 | 0.373 | 2459.768 |
| TVC-RO | 0.4 | 2 | 4 | 0.55 | 17520 | 3504 | 0.373 | 2411.382 |
| RO-MED | 0.3 | 1 | 4 | 0.54 | 8760 | 2628 | 0.373 | 1961.894 |
| RO-TVC | 0.4 | 1 | 4 | 0.54 | 8760 | 3504 | 0.373 | 2301.567 |
| RO-RO | 0.4 | 0 | 4 | 0.65 | 0 | 3504 | 0.373 | 2370.513 |

La tabla presenta los costes anuales finales de las finales diferentes combinaciones donde se puede ver que la opción más viable es la que combina ósmosis inversa y destilación multiefecto (RO-MED).

2. COMBINACIONES ALTERNATIVA II.

En las siguientes tablas se presentan los precios de energía eléctrica y térmica que corresponde a cada una de las combinaciones.

Precio de la energía eléctrica

| | | Zona 1 | | |
|--------|-----|--------|--------|--------|
| | | MED | TVC | RO |
| Zona 2 | MED | 421.25 | 404.50 | 387.75 |
| | TVC | 421.25 | 404.50 | 387.75 |
| | RO | 417.90 | 401.15 | 384.41 |

Precio de la energía térmica

| | | Zona 1 | | |
|--------|-----|--------|-------|------|
| | | MED | TVC | RO |
| Zona 2 | MED | 36.84 | 20.09 | 3.35 |
| | TVC | 36.84 | 20.09 | 3.35 |
| | RO | 33.49 | 16.74 | N/A |

| | Potencia eléctrica (MWe) | Potencia calorífica (MWt) | Inversión total (M\$) | Coste mantenimiento anual (M\$) | Energía térmica anual (Mwh) | Energía eléctrica anual (MWh) | Coste inversión anualizado (M\$) | Coste total anualizado (miles de euros) |
|---------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|----------------------------------|---|
| MED-MED | 0.3 | 11 | 8 | 0.6 | 96,360 | 2,628 | 0.75 | 6,004.23 |
| MED-TVC | 0.4 | 11 | 8 | 0.6 | 96,360 | 3,504 | 0.75 | 6,373.24 |
| MED-RO | 0.4 | 10 | 8 | 0.71 | 87,600 | 3,504 | 0.75 | 5,855.57 |
| TVC-MED | 0.6 | 6 | 8 | 0.6 | 52,560 | 5,256 | 0.75 | 4,529.34 |
| TVC-TVC | 0.7 | 6 | 8 | 0.6 | 52,560 | 6,132 | 0.75 | 4,883.68 |
| TVC-RO | 0.7 | 5 | 8 | 0.71 | 43,800 | 6,132 | 0.75 | 4,650.24 |
| RO-MED | 0.6 | 1 | 7 | 0.8 | 8,760 | 5,256 | 0.65 | 3,521.08 |
| RO-TVC | 0.7 | 1 | 7 | 0.8 | 8,760 | 6,132 | 0.65 | 3,860.75 |
| RO-RO | 0.7 | 0 | 7 | 0.91 | 0.00 | 6,132 | 0.65 | 3,920.90 |

La tabla presenta los costes anuales finales de las finales diferentes combinaciones donde se puede ver que la opción más viable es la que combina ósmosis inversa y destilación multiefecto (RO-MED).

ANEXO G

PRESUPUESTOS DESGLOSADOS

1. ALTERNATIVA I.

| | | Costes fijos (miles de €) | Costes Operacionales | | Costes totales anualizados (miles de €) |
|-----------------|-----|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|---|
| | | | Mantenimiento (miles de €/año) | Energía (miles de €/año) | |
| Desalinizadoras | DP1 | 3,000 | 350 | 1,019 | 1,649 |
| | DP2 | 1,000 | 190 | 29 | 313 |
| | DP3 | 1,000 | 640 | 747 | 1,481 |
| | DP4 | - | - | - | 61 |

| | | Costes energéticos (€/día) | Costes diarios (€/ día) | Costes totales (miles de € /año) |
|-----------------------------------|-------|-------------------------------|----------------------------|---|
| Plantas tratamiento agua residual | WWTP1 | 181 | 951 | 347 |
| | WWTP2 | 27 | 225 | 82 |

| | | | Coste inversión (miles de €) | | Coste operacional (miles de €/año) | Coste totales (miles de €/año) |
|------------|-------------------|----------------|------------------------------|--------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| | | | Tuberías | Bombas | | |
| Transporte | Agua desalinizada | Zona 1 | 10,648 | 8 | 6 | 2,681 |
| | | Zona 2 | 1,107 | 5 | 3 | 95 |
| | | DP1-Ferekampos | 823 | 55 | 102 | 153 |
| | | DP2-Emb | 277 | 41 | 53 | 79 |
| | Agua residual | Zona 1 | 1,940 | 52 | 59 | 223 |
| | | Zona 2 | 925 | 37 | 37 | 129 |

| Embalses | | Coste mantenimiento (miles de €/año) |
|----------|--|--|
|----------|--|--|

| | |
|------------|-------|
| Ferekampos | 1,798 |
| Emb2 | 124 |

2. ALTERNATIVA II.

| | | Costes fijos (miles de €) | Costes Operacionales | | Costes totales anualizados (miles de €) |
|-----------------|-----|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|--|
| | | | Mantenimiento (miles de €/año) | Energía (miles de €/año) | |
| Desalinizadoras | DP1 | 6,000 | 610 | 2,038 | 3,208 |
| | DP2 | 1,000 | 190 | 29 | 313 |
| | DP3 | 1,000 | 640 | 747 | 1,481 |
| | DP4 | - | - | - | 61 |

| | | Costes energéticos (€/día) | Costes diarios (€/ día) | Costes totales (miles de €/año) |
|-----------------------------------|-------|----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| | | | | |
| Plantas tratamiento agua residual | WWTP1 | 181 | 951 | 347 |
| | WWTP2 | 27 | 225 | 82 |

| Transporte | | | Coste inversión (miles de €) | | Coste operacional (miles de €/año) | Coste totales (miles de €/año) |
|------------|----------------------|--------|------------------------------|--------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| | | | Tuberías | Bombas | | |
| | Agua desalinizada | Zona 1 | 7,978 | 835 | 2,247 | 3,070 |
| | | Zona 2 | 1,727 | 314 | 693 | 883 |
| | Agua residual | Zona 1 | 1,940 | 13 | 59 | 245 |
| | | Zona 2 | 946 | 36 | 37 | 129 |